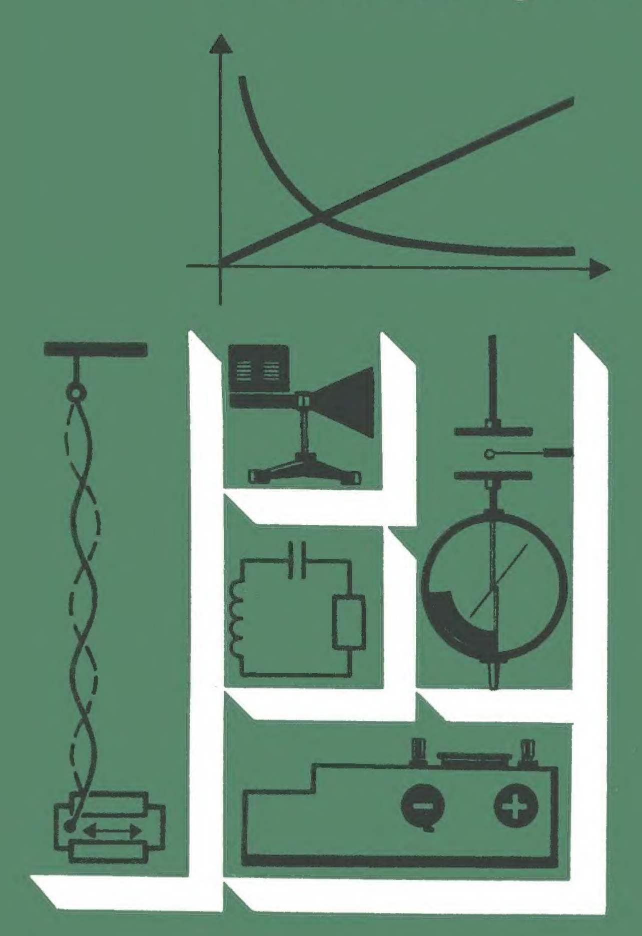
Библиотека учителя физики

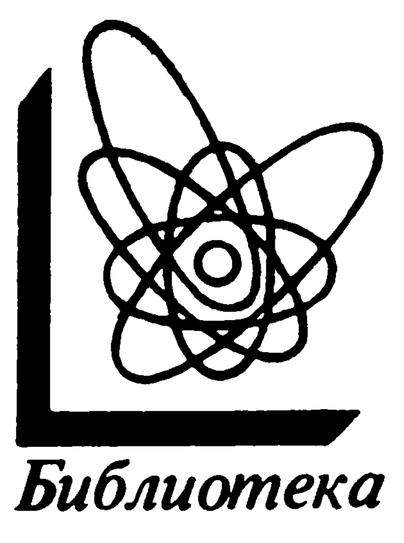


Н. М. Шахмаев
Н. И. Павлов
В. И. Тыщук

Физический эксперимент в средней школе

Физический эксперимент в средней школе





Библиотека учителя физики

Н. М. Шахмаев
Н. И. Павлов
В. И. Тыщук

Физический эксперимент в средней школе

Колебания и волны.
Квантовая физика

Рекомендовано Главным учебно-методическим управлением общего среднего образования Госкомитета СССР по народному образованию

МОСКВА
«ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1991

ББК 74.265.1
Ш31

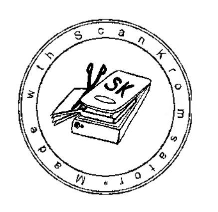
Рецензенты:
методист кабинета физики ЛГИУУ В. А. КОРАБЛЕВ (Ленинград); кандидат педагогических наук С. А. ХОРОШАВИН (Белгородский педагогический институт)

Шахмаев Н. М. и др.

Ш31 Физический эксперимент в средней школе: Колебания и волны. Квантовая физика / Н. М. Шахмаев, Н. И. Павлов, В. И. Тыщук.— М.: Просвещение, 1991.— 223 с.: ил.— (Б-ка учителя физики).— ISBN 5-09-001834-0.

В книге описаны методика и техника постановки демонстрационных опытов по разделам«Колебания и волны» и «Квантовая физика» с использованием приборов, вошедших в «Типовые перечни учебно-наглядных пособий и учебного оборудования для общеобразовательных школ», и самодельных приборов и приспособлений, изготовленных в школьных мастерских.

Ш $\frac{\textbf{4306010000—515}}{\textbf{103(03) —91}}$ **подписное**



ББК 74.265.1

ISBN 5-09-001834-0

ПРЕДИСЛОВИЕ

В предлагаемую вашему вниманию книгу вошли описания демонстрационных опытов по двум разделам школьной программы XI класса: «Колебания и волны» и «Квантовая физика». При этом демонстрационные опыты по оптике в соответствии с действующей программой рассмотрены в обоих разделах. Содержание опытов в основном соответствует школьной программе. Однако в книге приведено описание ряда опытов, демонстрация которых целесообразна лишь в классах с углубленным изучением физики, а также на факультативных занятиях. Эти опыты отмечены звездочкой (*).

В книге основное внимание уделено методике и технике постановки опытов. В тех случаях, когда использованы новые приборы, а также тогда, когда речь идет о постановке новых опытов, обращено внимание и на физическую сторону работы приборов и демонстрируемых явлений.

При описании простых, общеизвестных опытов авторы сознательно стремились быть краткими.

Для удобства учителя все опыты сгруппированы в небольшие параграфы. Не следует думать, что необходимо показывать все опыты, вошедшие в тот или иной параграф. Отбор необходимого числа опытов и порядок их демонстрации — прерогатива учителя.

Для постановки большинства опытов использовано стандартное оборудование кабинетов физики, наличие которого в школах предусмотрено «Типовыми перечнями учебно-наглядных пособий и учебного оборудования для общеобразовательных школ». Однако в ряде случаев использованы простые самодельные приборы, изготовление которых возможно в школьных мастерских. Описание этих приборов приведено в разделе III книги. Использование самодельных приборов значительно расширяет область применения приборов, вошедших в «Типовые перечни...», и позволяет значительно расширить экспериментальные возможности учителя. В тех случаях, когда опыт может быть поставлен с различным оборудованием, приведены варианты его постановки.

Так как промышленность в разные годы выпускала одни и те же демонстрационные приборы в разном оформлении, в книге применяются в основном приборы выпуска конца 70-х годов, которыми оснащены кабинеты большинства школ. При выборе той или иной модификации прибора одного и того же назначения авторы каждый раз при равенстве параметров отдавали предпочтение той из них, которая обеспечивает бо́льшую выразительность. Например, в большинстве демонстраций авторы используют универсальный выпрямитель ВУП-1, а не более позднюю модификацию ВУП-2 (так как нижнее расположение выходных клемм у ВУП-2 резко снижает видимость для учащихся цепей, собираемых с этим прибором).

При работе с пособием следует иметь в виду, что поскольку основой многих демонстрационных установок являются одни и те же базовые узлы (например, колебательный контур, пружинный маятник, источники и приемники излучений и т. п.), то они подробно описаны лишь в первой по порядку демонстрации, в которой используются. В дальнейшем на них делается ссылка типа «Собираем установку, описанную в опыте...».

При описании опытов авторы отказались от краткой формулировки цели опыта, так как она в абсолютном большинстве случаев очевидна из названия опыта.

Все рассмотренные в книге опыты в разное время были тщательно проверены в школах № 215, 444 и 710 Москвы, в школе № 2 г. Чебоксар и в школах № 2 и 3 г. Ровно.

Пособие написано под общим руководством Н. М. Шахмаева. Работа между авторами была распределена следующим образом:

Шахмаев Н. М. — § 1—12, 16, 17, 18 (за исключением опытов по оптике в § 11, 12);

Павлов Н. И. — § 13, 14, 19 и опыты по оптике в § 11, 12;

Тыщук В. И. — § 15, 20.

Раздел I. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Все колебательные и волновые процессы независимо от их природы описываются с помощью одних и тех же понятий, и для них справедливы одинаковые закономерности. Это позволяет подойти к изучению колебательных и волновых процессов с единой точки зрения независимо от их природы.

В этом случае объектом изучения становятся в первую очередь сами общие закономерности колебательных процессов; их изложение дополняется рассмотрением природы колеблющихся систем.

Элементы единого подхода к изучению колебательных и волновых процессов можно встретить в работах Х. Гюйгенса, М. В. Ломоносова, Р. Дэн, Дж. Рэлея, А. Г. Столетова, П. Н. Лебедева и других физиков. Однако лишь в работах Л. И. Мандельштама и его учеников единый подход к изучению колебаний стал рабочим инструментом, который систематически применялся как в решении научных проблем, так и в преподавании.

Остановимся коротко на тех новых методических возможностях, которые появляются при едином подходе к изучению колебательных и волновых процессов различной природы.

Прежде всего следует отметить, что в этом случае удается значительно глубже изучить те аналогичные явления, которые при традиционном подходе разбросаны почти по всему курсу физики. Например, при традиционном изучении колебательных и волновых явлений учащийся трижды изучает явление интерференции волн. При едином же подходе явление интерференции изучается только в разделе «Световые волны», но более глубоко. Существенно важно подчеркнуть, что при этом значительно возрастает и прочность знаний учащихся.

Это происходит прежде всего за счет укрепления первого звена познания — наблюдения изучаемого явления. Ученик сначала видит интерференцию когерентных волн на поверхности воды, затем слышит интерференцию когерентных звуковых волн. После этого с помощью известных уже ему приборов он убеждается в интерференции электроматнитных (в том числе и световых) волн. При этом может быть отмечена аналогичность схем экспериментальных установок.

Аналогичность вскрываемых закономерностей развивает интуицию учащихся и, что особенно важно, показывает на конкретном материале единство природы. Так, после того, как высказана мысль о наличии у света волновых свойств, учащиеся без труда не только делают вывод о том, что должны наблюдаться интерференция и дифракция света, но и предлагают схемы опытов для обнаружения этих явлений.

Единый подход к изложению колебаний и волн различной природы открывает новые возможности и для постановки учебного эксперимента, который в этом случае приобретает исключительную выразительность и убедительность вследствие использования современной электронной аппаратуры для наблюдения механических колебаний и волн.

Следует отметить и то, что при едином подходе к изучению колебательных и волновых процессов нет необходимости демонстрировать все изучаемые явления для колебаний и волн различной природы. Целесообразно ставить только те опыты, которые существенно необходимы для понимания изучаемых закономерностей и хорошо получаются в демонстрационном варианте. Это дает возможность учителю варьировать в постановке эксперимента.

Авторы сочли необходимым в ряде случаев предпослать опытам с электромагнитными колебательными системами аналогичные опыты с механическими колебательными системами. Это связано с тем, что опыты с механическими колебательными системами:

частично знакомы учащимся из курса физики IX класса, а потому при изучении электромагнитных колебаний на них целесообразно опереться;

более наглядны и просты для восприятия, чем опыты с электромагнитными колебательными системами.

Кроме того, их демонстрация позволит:

закрепить, расширить и углубить знания учащихся из курса физики IX класса;

создать необходимые предпосылки для формирования у учащихся представлений о внутреннем единстве закономерностей, присущих всем колебательным и волновым явлениям независимо от их природы.

Глава I. КОЛЕБАНИЯ

§ 1. Предварительные сведения о колебаниях

Опыты, описанные в этом параграфе, предназначены в основном для демонстрации на вводном занятии, на котором повторяется и углубляется материал, изученный в IX классе.

Наиболее сложные и трудоемкие опыты по записи осциллограммы колебаний могут быть быстро и хорошо проведены, если в кабинете физики есть потолочная балка и имеются массивный маятник с двойным подвесом и простейший лентопротяжный механизм (его описание дано в § 16).

Опыт 1. Колебательные системы

Понятие о колебательной системе существенно важно для последующего изучения колебательных и волновых процессов.

Подвесив к потолочной балке массивный маятник, демонстрируют его колебания. Не останавливая колебаний маятника, показывают колебания пружинного маятника, поплавка в цилиндре с водой, крутильного маятника (рис. 1), плоской пружины, зажатой в тисках, воды в U-образной трубке.

Особое внимание надо обратить на объяснение устройства крутильного маятника. Это связано с тем, что крутильный маятник будет использован в ряде последующих демонстраций.

Стойка маятника (белая пластина) и черная пластина скреплены одной свободно вращающейся в них осью. Внутренний конец спиральной пружины закреплен на подвижной (в этом опыте) черной пластине, а наружный — на белой пластине (устройство крутильного маятника рассмотрено в § 16).

Наконец, надо познакомить учащихся с электромагнитной колебательной системой — колебательным контуром. Для этого собирают установку, изображенную на рисунке 2. Колебательный контур собирают из демонстрационной батареи конденсаторов ($C=58$ мкФ), катушки индуктивности на замкнутом магнитопроводе от универсального трансформатора ($L=50$ Гн, $R\approx44$ Ом, $N=3\,600$ витков). Параметры контура: период электромагнитных колебаний $T\approx0{,}3$ с; добротность контура $Q\approx20$; время полного затухания колебаний примерно 5 с. За это время совершится примерно 10—15 колебаний. Эти параметры контура при его питании импульсами постоянного напряжения (от ВУП-1 или ВУП-2) позволяют использовать в качестве индикатора колебаний гальванометр от демонстрационного амперметра. Гальванометр подключается к клеммам вспомогательной катушки, намотанной поверх основной обмотки.

Для получения медленных электромагнитных колебаний необходимо иметь катушку с большей индуктивностью и сравнительно

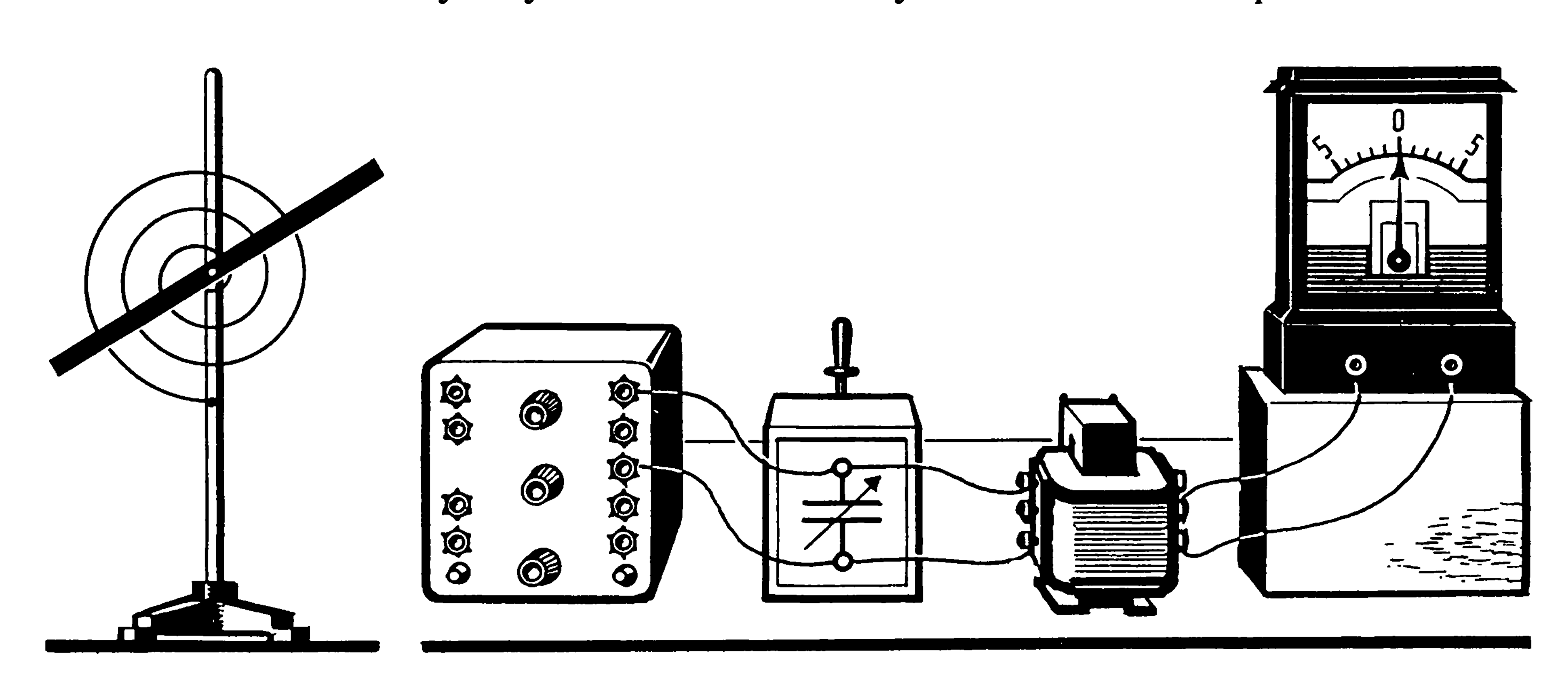


Рис. 1 Рис. 2

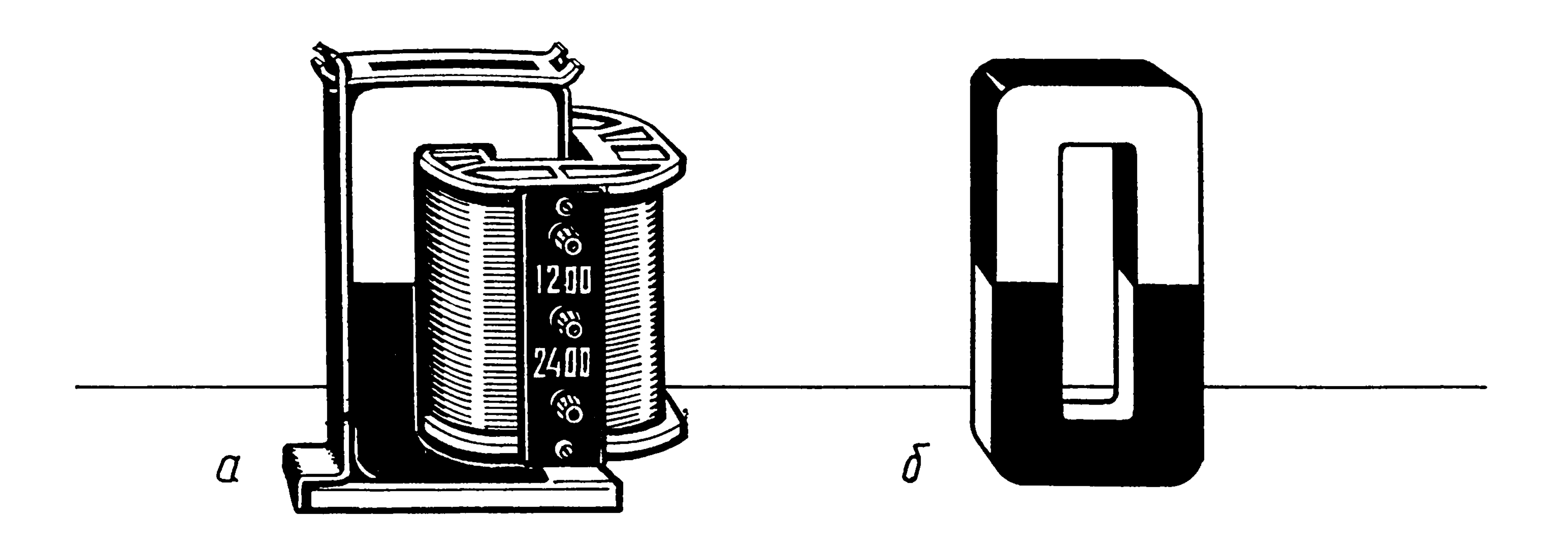


Рис. 3

небольшим сопротивлением. Иногда ошибочно думают, что желаемого результата можно достичь путем увеличения электроемкости конденсатора. Но это не так. Все дело в том, что увеличение электроемкости (при неизменной индуктивности) приводит к снижению добротности контура (которую, как известно, можно подсчитать по формуле $Q=\frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$) и, как следствие, к резкому снижению числа доступных для наблюдения колебаний. Например, при увеличении электроемкости контура в 100 раз его добротность уменьшится в 10 раз.

Киевский методист Б. Ю. Миргородский нашел интересный способ увеличения в 8—10 раз индуктивности катушки, выпускаемой Главучтехпромом. Для этого он предлагает заменить магнитопровод от школьного универсального трансформатора магнитопроводом от унифицированного трансформатора ТС-200.

Магнитная проницаемость материала магнитопровода трансформатора ТС-200 примерно в 10 раз выше, чем у материала магнитопровода демонстрационного школьного трансформатора.

Для замены магнитопровода надо лишь опилить напильником одну боковую сторону каркаса индукционной катушки на 1 мм (ширина окна магнитопровода трансформатора ТС-200 — 29 мм, а ширина катушки индуктивности — 30 мм). Индуктивность катушки при этом возрастает до 400 Гн. Внешний вид такой катушки показан на рисунке 3, *а*, а на рисунке 3, *б* показан магнитопровод ТС-200.

В результате замены магнитопровода период колебаний, добротность контура, время полного затухания колебаний и число наблюдаемых колебаний увеличатся в 2,5—3 раза. Период колебаний будет примерно 0,8—0,9 с, число наблюдаемых колебаний — до 25, а время полного затухания колебаний — до 20—26 с.

После этих наблюдений вводят понятие о колебательной системе. Надо указать, что колебательные системы при всем их разнообразии обладают рядом общих свойств:

1. У каждой колебательной системы есть положение устойчивого равновесия (у маятника — положение, при котором центр тяжести находится на одной вертикали с точкой подвеса; у вертикального пружинного маятника — положение, при котором его сила тяжести уравновешивается силой упругости пружины; у горизонтального пружинного маятника — положение, при котором обе пружины деформированы одинаково; у колебательного контура — такое состояние, при котором конденсатор не заряжен и в соединительных проводниках нет тока).

2. В каждой колебательной системе, после того как она выведена из положения устойчивого равновесия, появляется сила, стремящаяся возвратить ее в это положение. Происхождение этой силы может быть различным (у маятника — сила тяжести; у пружинного маятника — сила упругости пружины; у колебательного контура — сила, с которой электрическое поле действует на свободные электрические заряды).

3. В каждой колебательной системе помимо возвращающей силы есть фактор, не позволяющий системе сразу же принять положение устойчивого равновесия (в механических системах — инертность колеблющегося тела, в электрических — индуктивность системы).

Опыт 2. Демонстрация устройства и работы кулисного (синусного) механизма

После того как введено понятие о гармоническом колебании как о колебании, при котором: а) физические величины, характеризующие это колебание (скорость, ускорение, амплитуда, сила тока, напряжение и др.), изменяются с течением времени по синусоидальному закону:

$$x = X_m \sin \omega_0 t,$$

где x — значение колеблющейся величины; X_m — максимальное (амплитудное) значение этой величины; ω_0 — фаза колебаний, t — время; б) колебания продолжаются бесконечно долго (об этом часто забывают сказать ученикам, но это крайне важно, так как любое конечное во времени колебание негармонично), необходимо подчеркнуть, что гармоническое колебание — это удобная и допустимая идеализация реальных колебаний, которые всегда конечны.

В заключение этого разъяснения надо показать учащимся кулисный механизм и объяснить, что смещение кулисы, скорость ее движения и ускорение изменяются по закону синуса. (Для этого надо использовать соответствующий материал из курса математики.) Кроме того, надо показать, что время колебаний кулисы может быть неограниченно большим и в большинстве опытов, где механизм будет использован, $t \gg T$, где T — период колебаний кулисы.

Полезно сообщить учащимся, что очень часто колебательные системы называют одним словом — осциллятор. Этот термин происходит от латинского слова oscillo — качаюсь.

Опыты 3—4. Осциллограмма колебаний

1. Понятие осциллограммы проще и лучше всего ввести на примере колебаний маятника. Для этого собирают установку, изображенную на рисунке 4, *а*. Внутрь стакана маятника помещают сосуд с чернилами, в дно которого вставлен пустой стержень от шариковой ручки со спиленным концом. Объясняют учащимся, что двойной подвес обеспечивает постоянство плоскости качания маятника. Сообщают, что для равномерного движения бумажной ленты используется электродвигатель с постоянным числом оборотов. На классной доске рисуют схему устройства для движения бумажной ленты (рис. 4, *б*).

Отводят маятник от положения равновесия на 8—10 см в плоскости его качания и привязывают к стержню универсального штатива. Устраняют возможные колебания маятника и, подставив под него большую кювету, наливают в сосуд чернила.

Включают двигатель и тотчас же пережигают нить, удерживающую маятник в отведенном состоянии. После того как осциллограмма начнет записываться, снимают кювету. В конце записи подставляют под маятник кювету, включают двигатель и останавливают маятник.

Выразительность записи в основном зависит от согласования скорости движения ленты с периодом колебаний маятника, а также от интенсивности струи чернил и качества бумаги.

Хорошая осциллограмма получается, если подвесить маятник к потолочной балке ($l \approx 2$ м) и на валу двигателя применить шкив диаметром 15—20 мм (при частоте вращения $33\,^1/_3$ об/мин).

Наклон направляющего устройства с бумажной лентой в сторону класса делает процесс записи легконаблюдаемым. Однако угол наклона не должен превышать 30° (при большем угле наклона чернила будут стекать по бумаге — и осциллограмма будет испорчена).

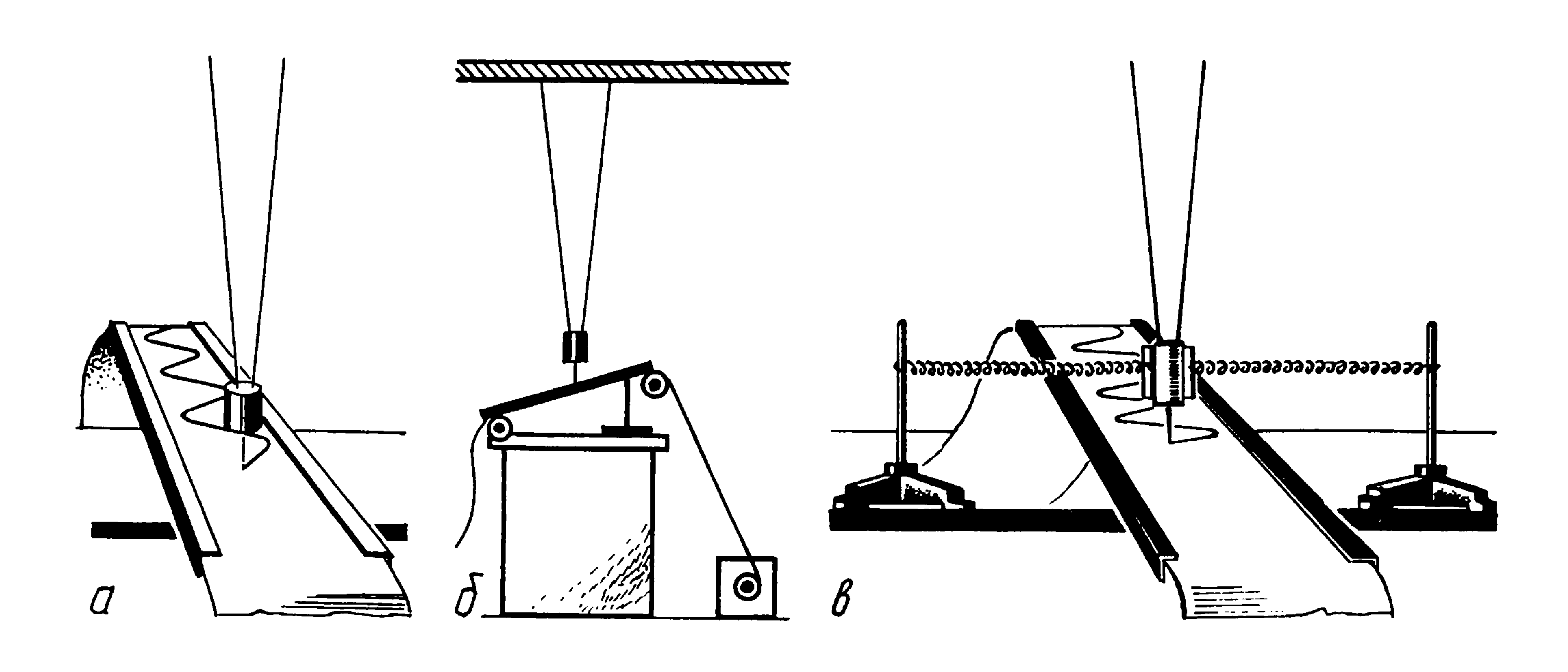


Рис. 4

Применяемые для записи колебаний чернила для авторучки следует разбавить водой в соотношении 1:3 и добавить примерно одну ложку сахара на 400 г раствора. Эта жидкость должна хорошо отстояться и не содержать частиц, которые могут засорить узкое выходное отверстие трубки. Полученная краска не растекается по бумаге. Бумагу лучше брать шероховатую (например, дешевые обои).

После записи колебаний бумажную ленту снимают с направляющего устройства, укрепляют на классной доске, и с ней проводится дальнейшая работа.

2. Заменив обычный маятник пружинным маятником с таким же примерно периодом колебаний, повторяют запись осциллограммы (рис. 4, *в*).

3. Затем подают на вход электронного осциллографа переменное напряжение от звукового генератора и наблюдают его осциллограмму при различной частоте сигнала.

Чтобы у учащихся не создалось неверного представления о том, что осциллограмма колебаний всегда синусоида, присоединяют к осциллографу микрофон, произносят несколько длинных гласных звуков (например, а-а-а... о-о-о... у-у-у...) и наблюдают их осциллограммы.

Опыты 5—6. Разность фаз двух гармонических колебаний

1. Для демонстрации разности фаз собирают установку, изображенную на рисунке 5, *а*.

Включив двигатель, отпускают один маятник и записывают осциллограмму его колебаний. Затем отпускают второй маятник в момент, когда первый отойдет в крайнее положение. На бумаге запишутся две осциллограммы почти без сдвига по фазе. Для выразительности опыта используют чернила двух цветов (например, синие и красные).

Получив осциллограммы, укрепляют бумажную ленту на доске и вводят понятие о синфазных колебаниях.

Укрепив вторую ленту, записывают осциллограммы маятников, колеблющихся в противофазе.

2. Если в кабинете есть двулучевой осциллограф или однолучевой осциллограф и электронный переключатель, следует показать разность фаз двух электромагнитных колебаний. Для получения двух электромагнитных колебаний, имеющих одинаковую частоту, но сдвинутых по фазе, собирают цепь, схема которой показана на рисунке 5, *б*. В качестве электроемкости следует использовать батарею конденсаторов. Лампу накаливания надо брать небольшой мощности (не более 100 Вт), рассчитанную на напряжение сети. До урока следует подобрать такую электроемкость, при которой между колебаниями напряжения генератора и напряжения, снимаемого с зажимов лампы накаливания, будет наибольшая разность фаз.

Для того чтобы не отвлекать внимание учащихся от основного, что они должны увидеть в опыте, батарею конденсаторов и лампу

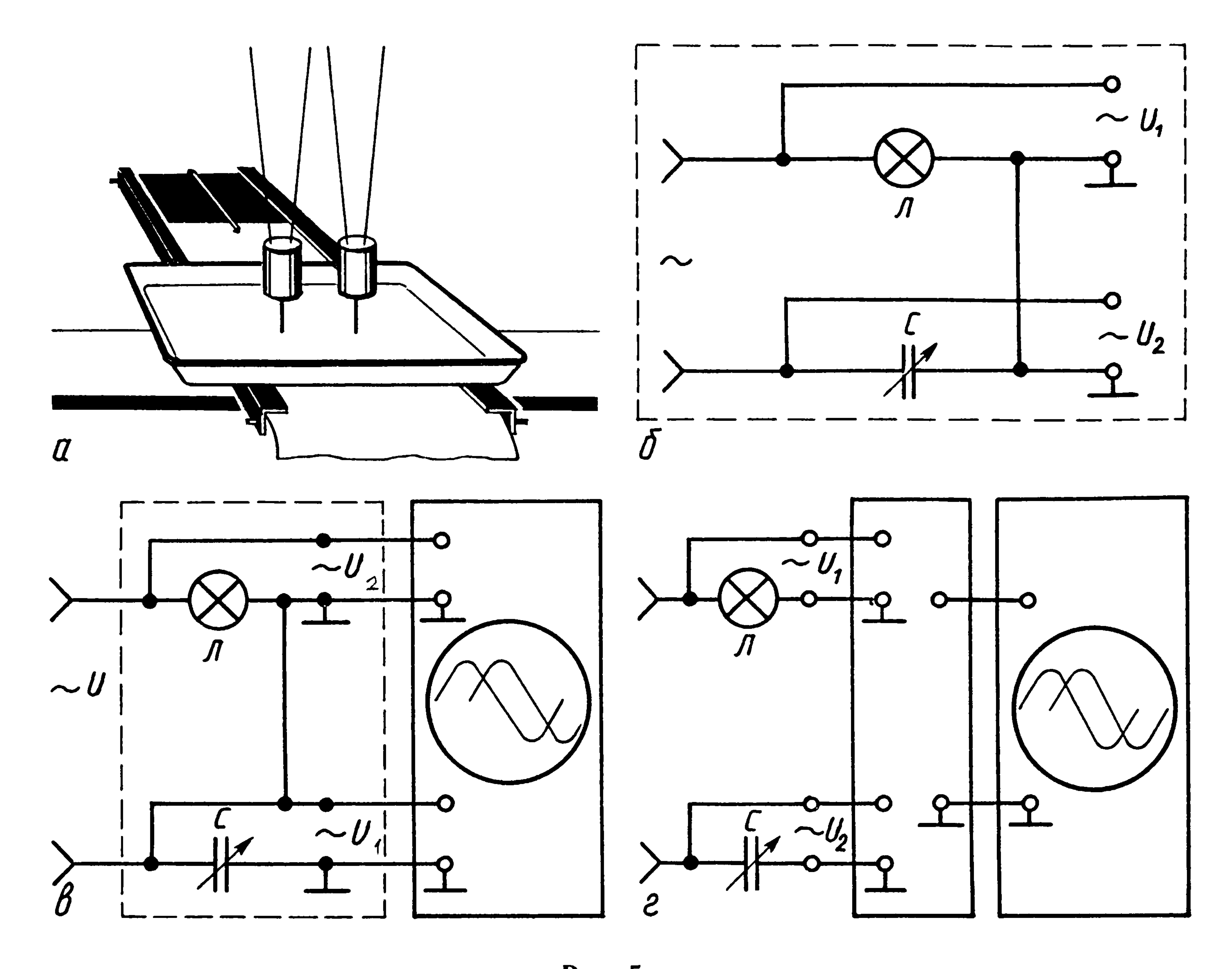


Рис. 5

следует закрыть вертикальной панелью с четырьмя клеммами (на рисунке 5, *в* панель показана штриховой линией) или, что лучше, поместить в положенный на бок ящик, на дне которого установлены четыре клеммы. Для учащихся — это источник двух напряжений, колебания которых сдвинуты по фазе. Включив осциллограф и ящик в цепь, на экране наблюдают две осциллограммы (рис. 5, *г*).

§ 2. Свободные колебания

При изучении свободных колебаний целесообразно рассмотреть последовательно свободные колебания модели математического маятника, пружинного маятника и электромагнитные колебания в контуре. Сначала рассматривают свободные колебания в системах без трения, а затем — свободные колебания в системах с трением.

При постановке опытов на первом этапе необходимо брать колебательные системы с высокой добротностью[1]. При изучении свободных колебаний в системах с трением, наоборот, следует использовать колебательные системы с малой добротностью.

[1] Добротность колебательной системы определяется по формуле $Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E}$, где E — энергия, сообщенная колебательной системе, а ΔE — убыль энергии в колебательной системе за период.

о— Опыты 7—8. Демонстрация свободных колебаний

1. Отведя массивный маятник от положения равновесия, обращают внимание учащихся на то, что в этом случае колебательной системе сообщается дополнительная потенциальная энергия и система выводится из состояния устойчивого равновесия.

Наблюдая колебания маятника, обращают внимание учащихся на превращения энергии в колебательной системе:

$$W_p \to W_k \to W_p \to W_k \to W_p \to \ldots$$

При отсутствии трения максимальное значение потенциальной энергии равно максимальному значению кинетической энергии и колебания продолжались бы бесконечно.

Остановив маятник, ударяют по нему молотком и наблюдают в этом случае свободные колебания. Затем делают вывод, что свободные колебания в системе возникают при внешнем воздействии на систему, в результате которого она выходит из состояния устойчивого равновесия.

2. Для демонстрации свободных электромагнитных колебаний собирают установку по схеме, показанной на рисунке 6. Чтобы получить колебания с не очень заметным затуханием, в качестве контурной катушки используют катушку на 6 В от универсального трансформатора и конденсатор электроемкостью 0,5 мкФ. При этом в контуре возникают колебания довольно высокой частоты.

Для лучшей видимости осциллограммы, слегка расфокусировав луч в электронно-лучевой трубке, увеличивают его яркость до максимальной.

Перебрасывая ключ то влево, то вправо, получают несколько не очень хорошо просматриваемых осциллограмм.

Объясняют учащимся, что переброска ключа вправо и влево равноценна подаче в контур П-образных импульсов. Поэтому ключ можно заменить генератором П-образных импульсов. Не останавливаясь на устройстве и принципе работы этого генератора, пока-

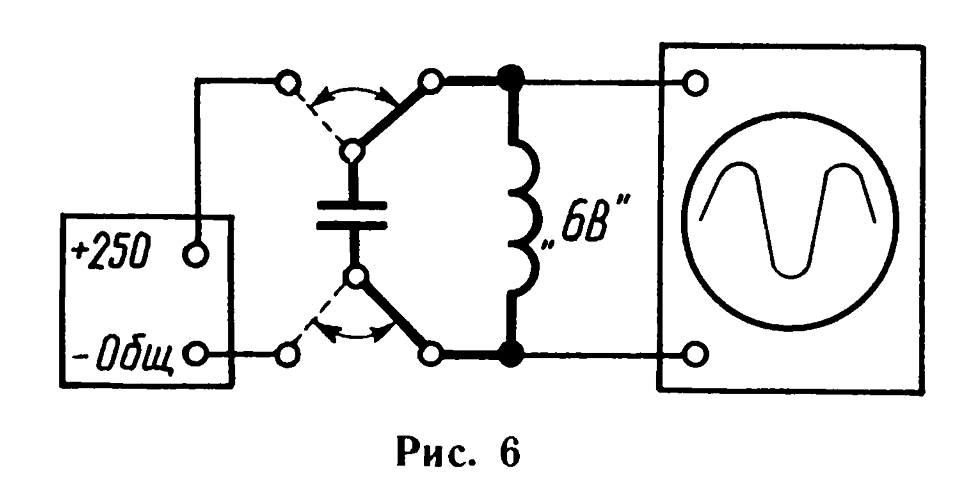


Рис. 6

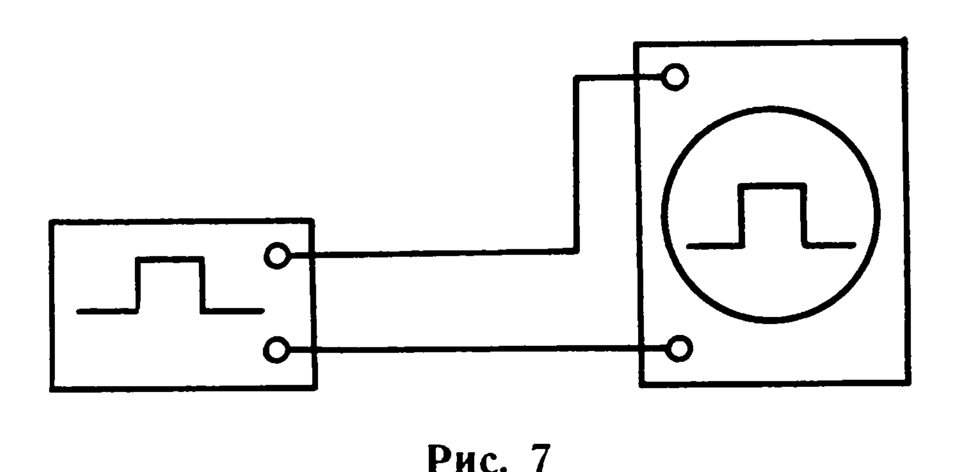


Рис. 7

зывают с помощью осциллографа, что генератор действительно дает П-образные импульсы (рис. 7). Частоту и напряжение этих импульсов можно регулировать[1].

Собрав установку, изображенную на рисунке 8, подбирают необходимую частоту импульсов и наблюдают устойчивую осциллограмму колебаний. Чтобы затухание колебаний не было заметно, масштаб развертки по горизонтали делают таким, чтобы на экране уместился только один период.

3. Если в школе нет генератора П-образных импульсов, можно использовать пилообразные импульсы, вырабатываемые генератором развертки осциллографа. В большинстве осциллографов выводы от генератора развертки расположены на его задней панели. В этом случае автоматически устанавливается синхронизация подачи импульсов с колебаниями в контуре.

Опыты 9—10. Амплитуда свободных колебаний

1. Меняя угол отклонения маятника (или силу удара), наблюдают изменение амплитуды колебаний. Делают вывод, что амплитуда свободных колебаний определяется той энергией, которая сообщается колебательной системе извне.

2. Собирают установку для демонстрации свободных электромагнитных колебаний (см. рис. 8). Меняя напряжение П-образных импульсов, показывают, что амплитуда свободных электромагнитных колебаний зависит от напряжения подаваемых в контур импульсов.

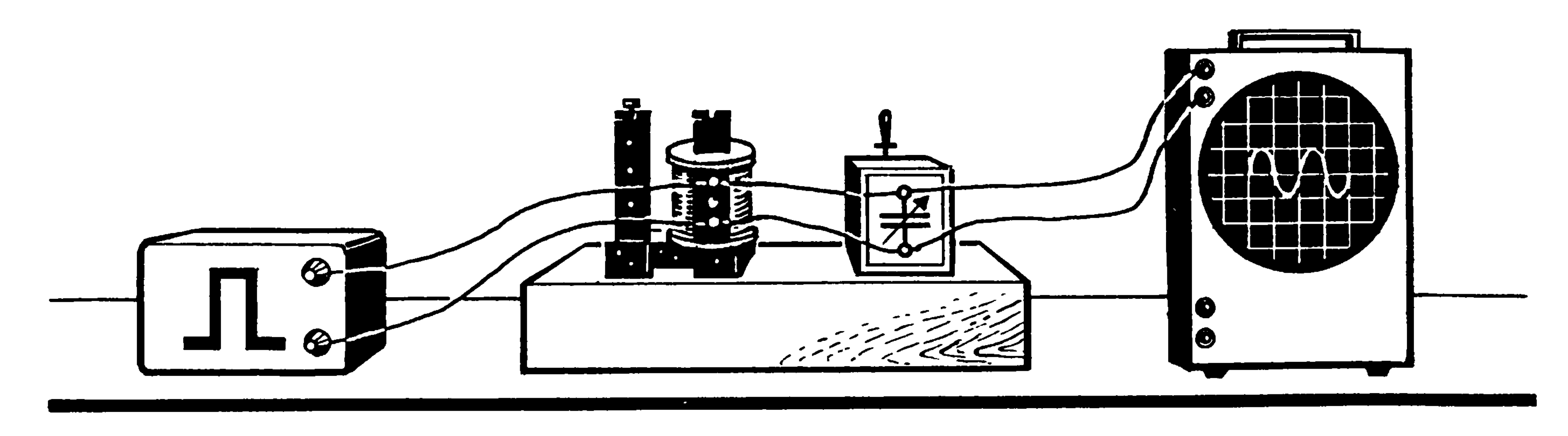


Рис. 8

[1] Промышленность не выпускает для школ генераторы П-образных импульсов. В § 16 описаны два простых генератора П-образных импульсов, которые легко изготовить на занятиях физического кружка.

Опыты 11—13. Частота свободных колебаний

1. Формулу для определения периода (частоты) свободных колебаний следует вывести математически и проиллюстрировать ее справедливость на опытах.

При выводе формулы периода колебаний маятника напоминают, что максимальное значение потенциальной энергии равно максимальному значению кинетической энергии маятника:

$$W_{pm} = W_{km},$$

или

$$mgH_m = \frac{1}{2} m v_m^2.$$

Учащимся уже известно, что $v_m = \omega_0 X_m$. Максимальную высоту подъема H_m находим из подобия треугольников BCO и ABD (рис. 9):

$$\frac{H_m}{X_m} = \frac{\frac{1}{2} X_m}{l}, \text{ откуда } H_m = \frac{X_m^2}{2l}.$$

Подставляя значения v_m и H_m в выражения для кинетической и потенциальной энергии, получаем

$$mg \frac{X_m^2}{2l} = \frac{m \omega_0^2 X_m^2}{2}.$$

Отсюда $\omega_0^2 = \frac{g}{l}$, или $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$.

Так как $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, то $T = 2\pi \sqrt{\frac{g}{l}}$.

Справедливость полученной формулы иллюстрируют опытами. Два маятника одинаковой длины, но различной массы отводят с помощью дощечки на одинаковые углы и одновременно отпускают.

Маятники колеблются с одинаковой частотой, что свидетельствует о независимости частоты колебаний от массы маятника.

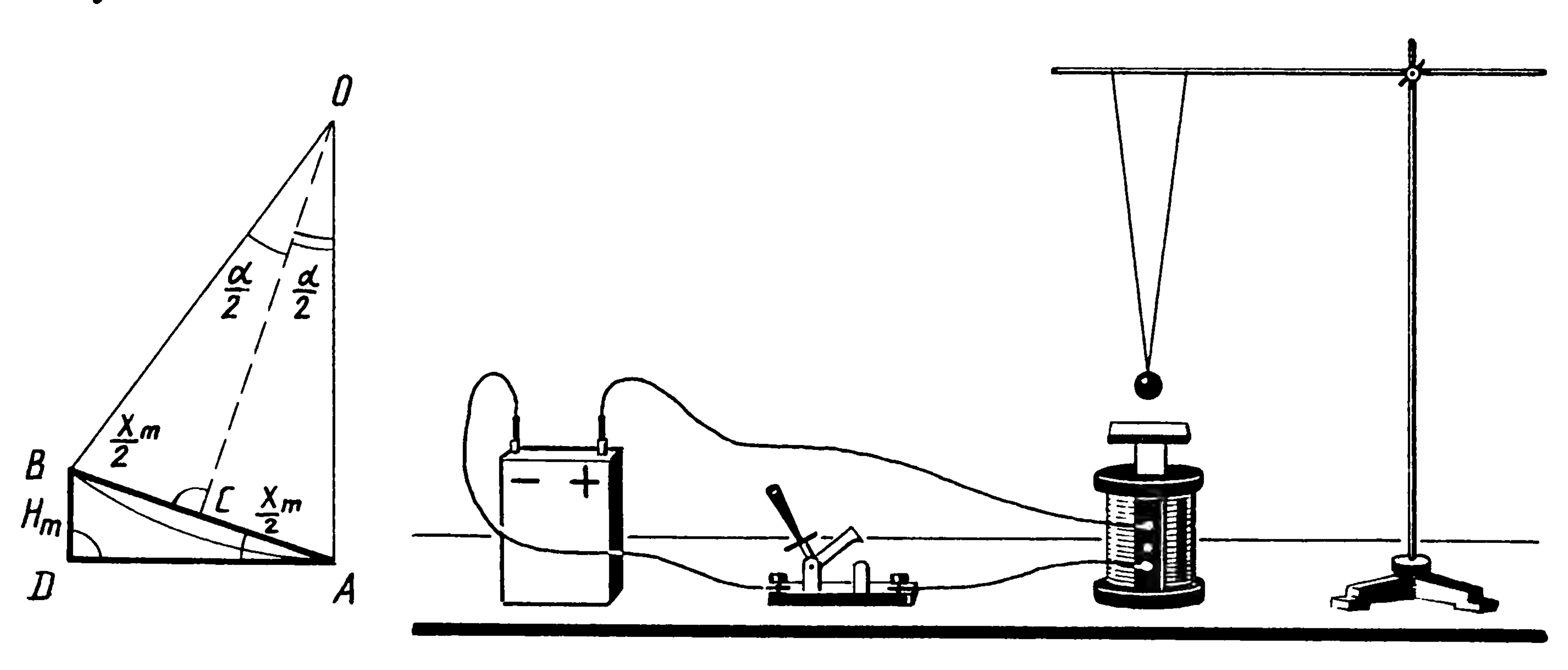


Рис. 9 Рис. 10

Для демонстрации этого опыта удобны маятники одинакового объема, но изготовленные из разных материалов: один — из чугуна, а другой — из пенопласта.

Остановив маятник с малой массой, изменяют длину массивного маятника и замечают изменения частоты колебаний.

Для демонстрации зависимости частоты от ускорения свободного падения располагают под маятником электромагнит (рис. 10). Отводят маятник в сторону и затем одновременно включают секундомер и отпускают маятник. Отсчитывают 10—20 колебаний и, заметив время, определяют частоту колебаний ν_1. Повторяют опыт с включенным электромагнитом и вновь определяют частоту ν_2, которая оказывается больше частоты колебаний ν_1.

Для успеха опыта важно, чтобы амплитуда колебаний была небольшой.

2. Формулу периода колебаний пружинного маятника проще всего вывести также исходя из равенства максимальных значений потенциальной и кинетической энергии маятника, а затем проиллюстрировать ее справедливость опытами:

$$W_{pm}=W_{km},$$

или

$$\frac{kX_m^2}{2}=\frac{mv_m^2}{2}.$$

Учитывая, что $v_m=\omega_0 X_m$, получаем

$$\frac{kX_m^2}{2}=\frac{m\omega_0^2 X_m^2}{2},$$

откуда $\omega_0^2=\frac{k}{m}$, а $\omega_0=\sqrt{\frac{k}{m}}$.

Но $\omega_0=\frac{2\pi}{T}$, поэтому $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

Для иллюстрации этой формулы собирают установку, изображенную на рисунке 11, *а*. Для компенсации силы тяжести ведерко

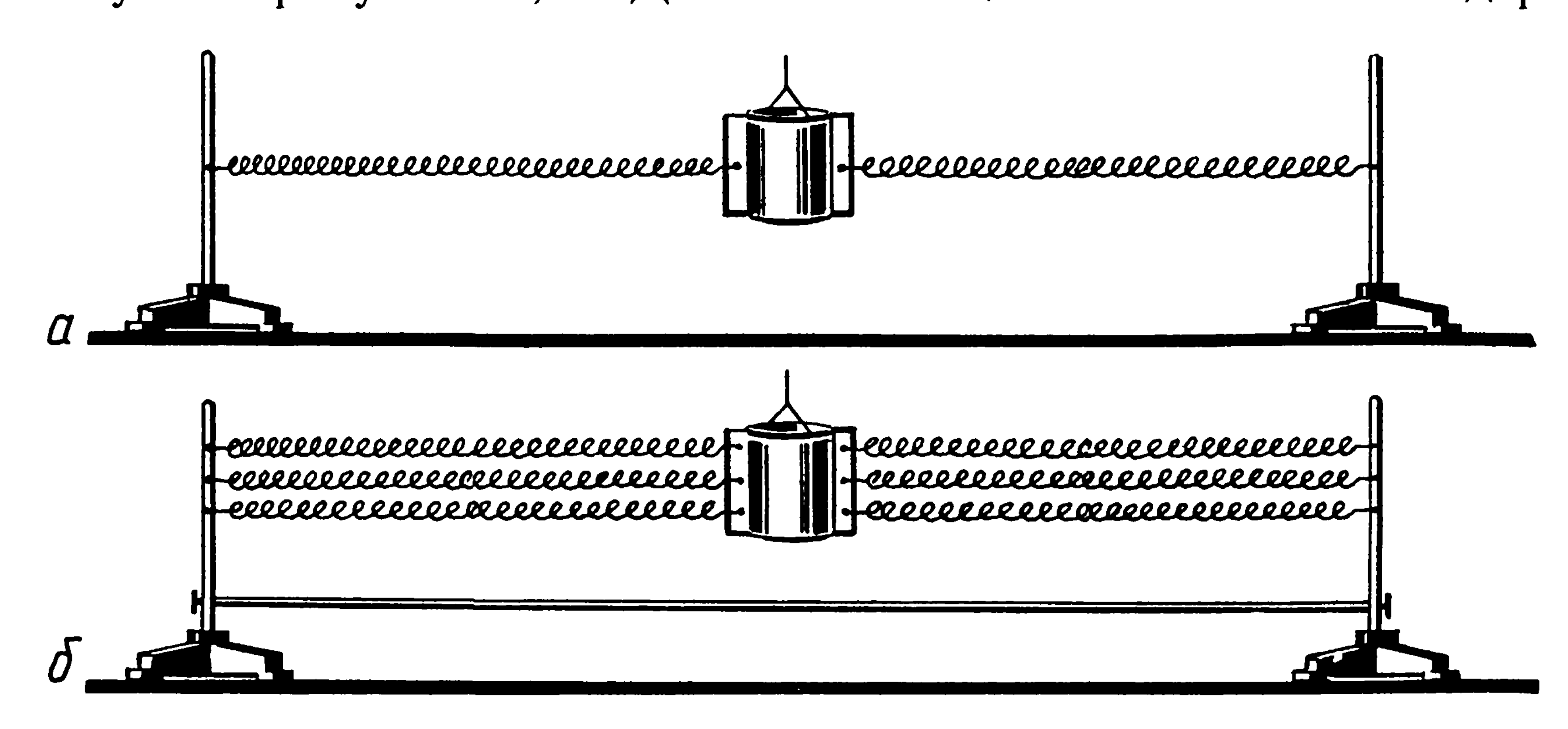


Рис. 11

маятника подвешено на нити к потолочной балке, а если в кабинете нет потолочной балки — то к штативу двойной высоты.

Оставив стакан маятника пустым, определяют частоту его колебаний ν_1.

Затем помещают внутрь стакана тело, масса которого в 4 раза больше массы стакана, и вновь определяют частоту колебаний ν_2. Она оказывается примерно в 2 раза меньше.

Повторяют опыт при массе маятника, в 9 раз большей первоначальной. Частота оказывается примерно в 3 раза меньше первоначальной.

Оставив массу неизменной, прикрепляют еще две пружины (рис. 11, *б*) и убеждаются, что частота при этом увеличивается. Прикрепив еще две пружины, замечают, что частота увеличилась еще больше.

3. Перед демонстрацией зависимости частоты свободных электромагнитных колебаний от параметров контура следует вывести формулу для расчета частоты этих колебаний. Для этого используют равенство максимальной энергии электрического поля конденсатора максимальной энергии магнитного поля катушки.

Поскольку к этому времени учащиеся еще не знают формулы для подсчета индуктивного сопротивления катушки, им эту формулу следует сообщить, отметив, что она будет обоснована позже.

Зависимость частоты колебаний от индуктивности и емкости контура надо показать на опытах. Для этого собирают установку для демонстрации свободных электромагнитных колебаний (см. рис. 8) и наблюдают осциллограмму.

Медленно снимая катушку с магнитопровода, демонстрируют увеличение частоты колебаний. Делают вывод о зависимости частоты колебаний от индуктивности.

Увеличивая, а затем уменьшая электроемкость конденсатора, включенного в контур, показывают зависимость частоты от электроемкости.

§ 3. Свободные колебания в системах с трением

При изучении свободных колебаний не учитывались силы трения (сопротивления) в колебательных системах. Такая идеализация систем допустима потому, что во многих случаях трение (сопротивление) столь мало, что его можно в ряде расчетов не учитывать. Так, колебательные контуры приемных станций «Орбита» находятся при температуре —196 °С и обладают ничтожно малым сопротивлением, а у хорошего камертона потери энергии за период составляют 0,0001 его первоначальной энергии.

Однако в большинстве случаев сопротивление необходимо учитывать.

Опыты 14—15. Затухание колебаний в реальных колебательных системах

1. Отводят пружинный маятник в сторону и наблюдают его колебания. Отмечают, что колебания маятника затухают. Выясняют причины затухания. Изменив трение (рис. 12) (для этого к маятнику прикрепляют демпфер, площадь которого зависит от вязкости среды: в воздухе большая, а в воде малая), вновь наблюдают колебания маятника и убеждаются в справедливости сделанного вывода.

Устанавливают устройство для записи осциллограммы колебаний маятника (см. рис. 4). Включив двигатель лентопротяжного устройства, записывают осциллограмму колебаний маятника

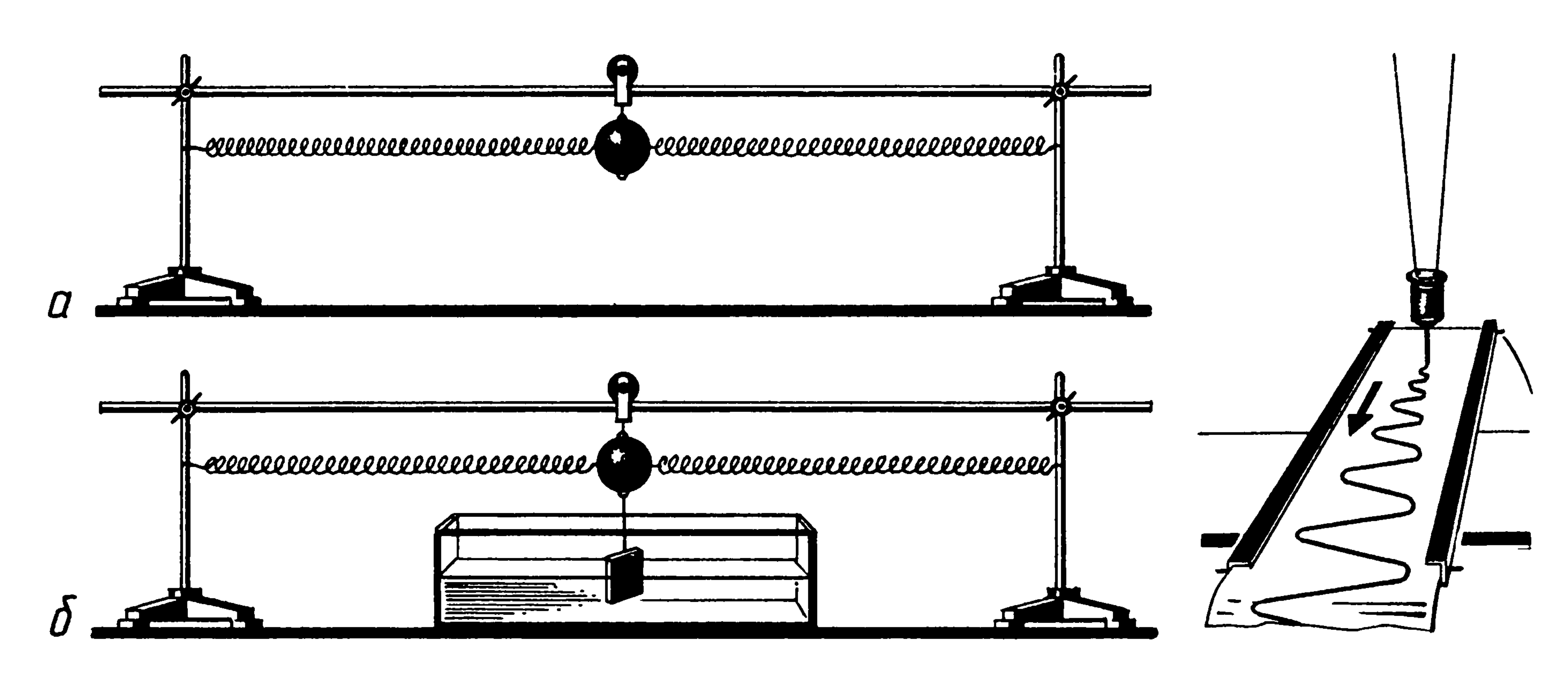


Рис. 12 Рис. 13

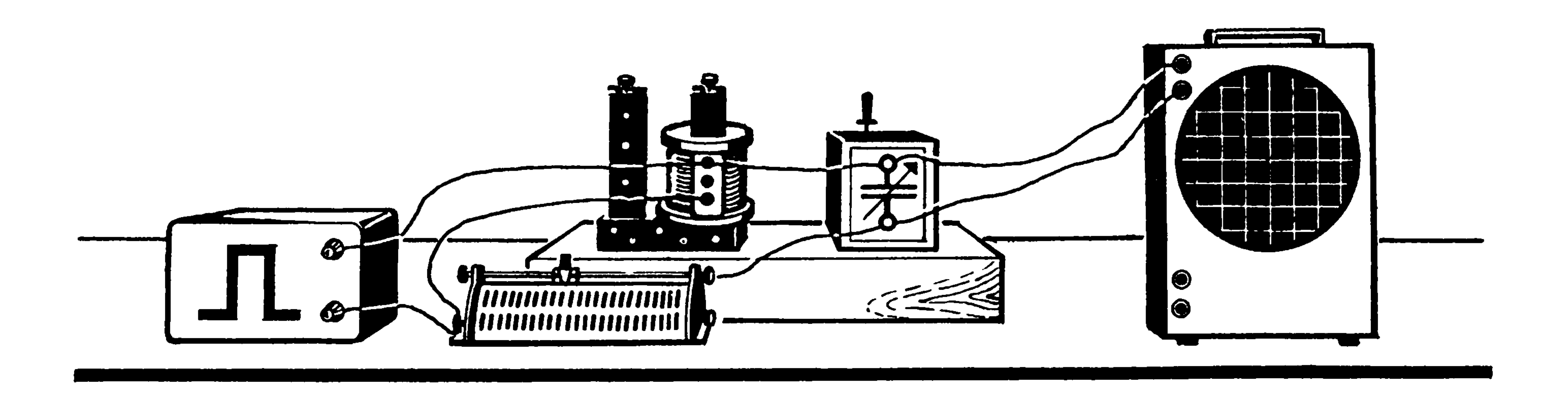


Рис. 14

(рис. 13). Обращают внимание учащихся на то, что при большом трении колебания не являются периодическими.

2. Собирают установку по схеме, изображенной на рисунке 14. Подобрав частоту П-образных импульсов, равную частоте горизонтальной развертки, наблюдают на экране осциллографа устойчивую осциллограмму свободных колебаний в контуре. Меняя с помощью

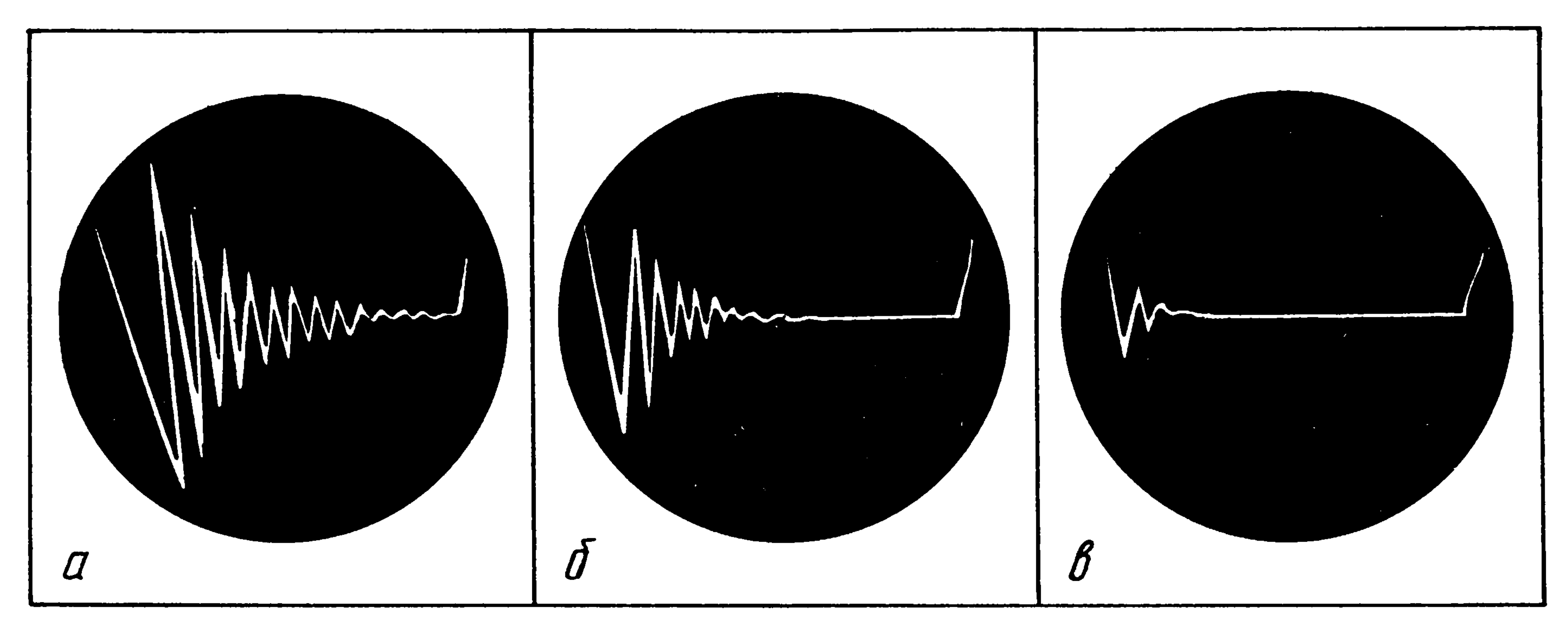


Рис. 15

реостата сопротивление контура, демонстрируют увеличение и уменьшение затухания колебаний. При очень большом сопротивлении колебаний в контуре нет (рис. 15).

Воспроизводят осциллограммы колебаний в контуре на доске. На основании анализа осциллограмм приходят к выводу, что свободные колебания в контуре непериодичны и к ним, строго говоря, термин «период» неприменим.

Для описания колебаний в системах с трением вводят понятие об условном периоде. Это промежуток времени, за который колебательная система дважды достигнет максимальных значений в одном и том же направлении. Сообщают учащимся, что при малом трении (сопротивлении) условный период мало отличается от периода гармонических колебаний и с достаточной точностью может быть определен по формулам, ранее выведенным для гармонических колебаний.

Сообщают учащимся, что к свободным колебаниям в системах с трением и термин «амплитуда» (который обозначает постоянное во времени максимальное отклонение системы от положения равновесия) строго говоря, неприменим.

Однако термин «амплитуда» применяют и к затухающим колебаниям, но понимают под ним наибольшие значения, которых достигает соответствующая величина (смещение, скорость, ускорение, заряд, сила тока и т. п.) в течение одного выбранного колебания.

Опыты 16—17*. Добротность колебательной системы

1. Выводят одновременно из положения равновесия два одинаковых маятника, один из которых снабжен демпфером (см. рис. 12). Обращают внимание учащихся на то, что обоим маятникам сообщается извне одинаковая энергия. Отпускают оба маятника одновременно и наблюдают их качания. Замечают, что колебания маятника с демпфером затухают быстрее, чем колебания маятника без демпфера. Обсуждая результаты опыта, делают вывод, что эти две колебатель-

ные системы отличаются друг от друга потерями энергии за один условный период.

2. Проводят аналогичные опыты с колебательным контуром, в котором изменяют лишь сопротивление (см. рис. 14).

Сообщают, что отношение полной энергии колебательной системы E к убыли энергии ΔE за условный период ΔT может служить характеристикой колебательной системы и что величина

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E}$$

получила название добротности колебательной системы.

§ 4. Вынужденные колебания

Изучая свободные колебания, учащиеся имели дело с изолированными колебательными системами. Поэтому важно отметить, что в случае вынужденных колебаний на колебательную систему действует периодическая внешняя сила.

Изучение вынужденных колебаний целесообразно проводить по такому же плану, что и изучение свободных колебаний: а) условия возникновения вынужденных колебаний; б) энергетические преобразования в колебательной системе; в) частота вынужденных колебаний; г) амплитуда вынужденных колебаний (и резонанс); д) фаза вынужденных колебаний.

Если при свободных колебаниях характер колебательного процесса в основном зависит от параметров колебательных систем, то в случае вынужденных колебаний характер процесса определяется не только свойствами системы, но и существенно зависит от внешней силы. При этом в средней школе достаточно ограничиться рассмотрением случая, когда на колебательную систему действуют сила или напряжение, изменяющиеся по гармоническому закону:

$$f = F_m \sin \omega t;$$
$$u = U_m \sin \omega t.$$

Опыты 18—21. Примеры вынужденных колебаний

Основная цель описанных ниже опытов — создать у учащихся первоначальные представления о вынужденных колебаниях, показать, что вынужденные колебания в колебательных системах возникают в результате непрерывного действия на систему периодически изменяющейся силы.

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 16. Поскольку эта установка будет использована в ряде последующих опытов, обращают внимание учащихся на колебательную систему — пружинный маятник — и на источник вынуждающих колебаний (вынуждающей силы) — кулисный механизм. Необходимо также сообщить учащимся, что сила, с которой кулисный механизм действует на

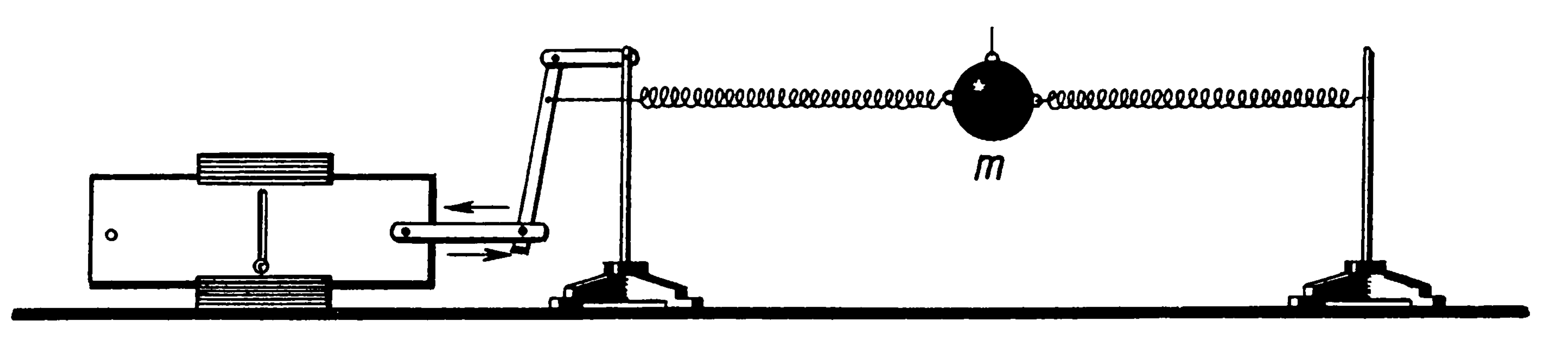


Рис. 16

колебательную систему, изменяется по гармоническому закону. Для доказательства этого надо напомнить, что сила упругости пружины пропорциональна ее удлинению Δl (это учащиеся знают из курса механики). Кроме того, из курса математики учащимся известно, что смещение точки, движущейся по окружности (в нашем случае оно равно Δl), изменяется пропорционально синусу угла между радиусом вращения и горизонтальным диаметром, т. е.

$$\Delta l = R \sin \varphi = R \sin \omega t.$$

Следовательно, сила, с которой вибратор действует на пружинный маятник, равна:

$$f = k\Delta l = kR \sin \omega t = F_m \sin \omega t,$$

где $F_m = kR$.

2. Устанавливают стальную пластину около школьного демонстрационного электромагнита, питаемого переменным током от звукового генератора (рис. 17).

Подобрав (до урока) необходимую длину пластины и частоту, включают звуковой генератор. Колебания пластины удобно наблюдать при малых частотах.

3. Подключают к звуковому генератору громкоговоритель и слушают издаваемые им звуки.

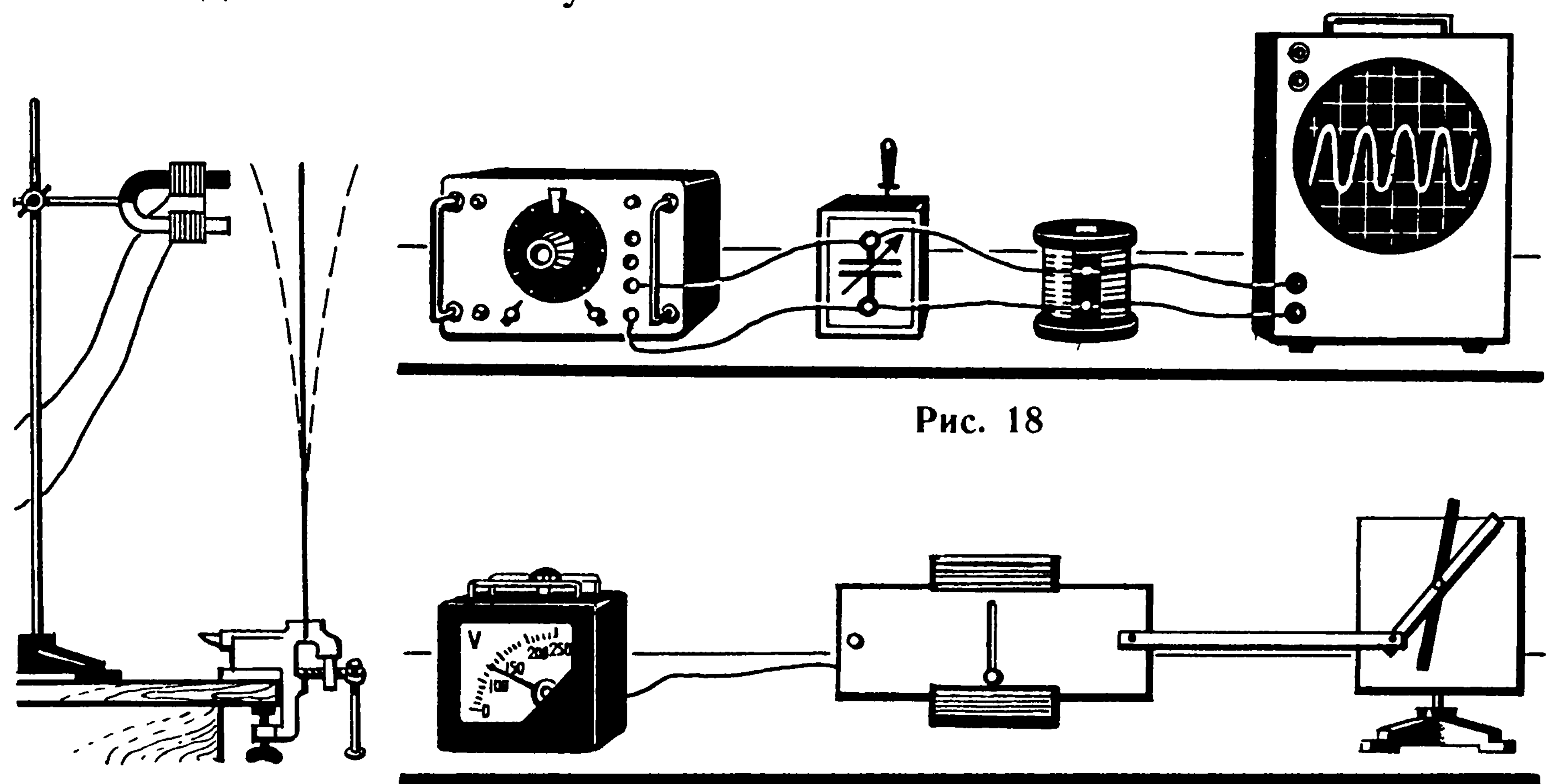


Рис. 18

Рис. 17

Рис. 19

4. Для демонстрации вынужденных электромагнитных колебаний в колебательном контуре собирают установку, изображенную на рисунке 18. В качестве катушки индуктивности можно взять любую катушку от универсального трансформатора, а в качестве конденсатора — демонстрационную батарею конденсаторов. Поскольку подобные установки будут использоваться в ряде последующих опытов, необходимо обратить внимание, что установка состоит из: а) источника вынуждающих колебаний — звукового генератора, напряжение которого изменяется по синусоидальному закону:

$$u = U_m \sin \omega t;$$

б) колебательной системы — колебательного контура; в) индикатора колебаний — электронного осциллографа. Включив звуковой генератор, демонстрируют, что в колебательном контуре возникают вынужденные колебания.

Опыты 22—25. Частота вынужденных колебаний

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 19. Использованный в этой установке крутильный маятник учащиеся уже видели при введении понятия о колебательной системе, но тогда белая пластина была стойкой маятника, а черная пластина, соединенная со спиральной пружиной, являлась колебательной системой. В опыте, который учащиеся должны увидеть, белая пластина соединена с вибратором и, по существу, является своеобразным индикатором вынуждающих колебаний (вынуждающей силы). Черная пластина совершает вынужденные колебания. На это необходимо обратить внимание учащихся. Включив двигатель вибратора, замечают, что частота вынужденных колебаний белой пластины равна частоте колебаний вибратора. Меняют частоту колебаний вибратора и наблюдают, что одновременно меняется и частота вынужденных колебаний белой пластины.

2. Для демонстрации равенства частоты вынужденных электромагнитных колебаний частоте вынуждающих колебаний собирают установку, изображенную на рисунке 18, но на второй вход осциллографа подают напряжение с генератора. Меняя частоту электромагнитных колебаний звукового генератора, наблюдают (по осциллограмме), что меняется и частота вынужденных колебаний.

Опыты 26—27. Амплитуда вынужденных колебаний. Резонанс

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 16. Включив вибратор, наблюдают вынужденные колебания груза маятника. Пользуясь демонстрационной линейкой, определяют амплитуду вынужденных колебаний.

Увеличивают амплитуду вынуждающих колебаний (для этого изменяют расстояние пальца от оси двигателя) и замечают, что при этом увеличивается амплитуда вынужденных колебаний.

Еще больше увеличивают амплитуду вынуждающей силы и наблюдают дальнейшее увеличение амплитуды вынужденных колебаний. Делают вывод, что амплитуда вынужденных колебаний пропорциональна амплитуде вынуждающих колебаний: $X_m \sim F_m$.

С помощью демпфера увеличивают трение (уменьшают добротность). Учащиеся видят, что амплитуда колебаний уменьшается. Еще более увеличив трение, наблюдают дальнейшее уменьшение амплитуды вынужденных колебаний. Делают вывод, что амплитуда вынужденных колебаний обратно пропорциональна силе трения:

$$X_m \sim \frac{1}{F_{\text{тр}}}.$$

Плавно меняют частоту вынуждающих колебаний и замечают, что амплитуда вынужденных колебаний сложным образом зависит от частоты: сначала с увеличением частоты амплитуда вынужденных колебаний растет, достигает некоторого максимального значения, а затем уменьшается.

Выключают вибратор. Отведя маятник от положения равновесия, дают ему возможность совершить несколько свободных колебаний и по затраченному времени определяют его собственную частоту.

Вновь включают вибратор и, меняя частоту его колебаний, добиваются максимальной амплитуды вынужденных колебаний. Определив частоту вынуждающих колебаний, обнаруживают, что она близка к собственной частоте колебаний маятника. Делают вывод, что амплитуда вынужденных колебаний зависит от соотношения частот свободных и вынуждающих колебаний. При равенстве частот амплитуда достигает максимального значения.

2. Собирают установку, изображенную на рисунке 20. На экране осциллографа наблюдают осциллограмму вынужденных колебаний в контуре LC. (Параметры L и C некритичны.) Опыт хорошо удается, если в качестве катушки индуктивности использовать катушку от универсального трансформатора, рассчитанную на 220 В, надетую на магнитопровод, а в качестве конденсатора — демонстрационную батарею конденсаторов (электроемкость батареи — 10—20 мкФ).

Меняют амплитуду вынуждающих колебаний (напряжение звукового генератора). При этом изменяется также амплитуда вынужденных колебаний ($A \sim A_{\text{вын}}$).

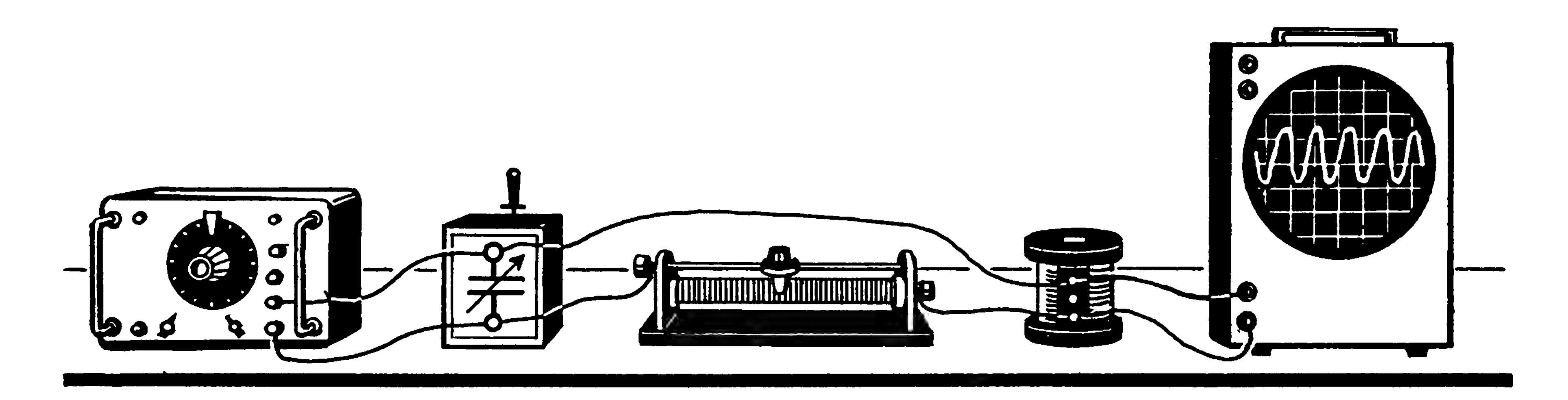


Рис. 20

Плавно меняют частоту вынуждающих колебаний: сначала амплитуда вынужденных колебаний растет, достигает максимума, а затем уменьшается.

Изменяя сопротивление контура, замечают, что при этом изменяется и амплитуда вынужденных колебаний $\left(A \sim \frac{1}{R}\right)$. Влияние сопротивления контура на амплитуду вынужденных колебаний различно на различных участках резонансной кривой: вдали от резонанса сопротивление не играет существенной роли, и его изменение мало влияет на амплитуду вынужденных колебаний, в области же резонанса силы трения играют существенную роль, и их изменение резко сказывается на изменении амплитуды вынужденных колебаний. С увеличением трения вся кривая резонанса опускается вниз, но максимум этой кривой опускается гораздо больше, чем области, далекие от резонанса. Поэтому хорошими резонансными свойствами обладают лишь колебательные системы с большой добротностью.

Опыт 28. Резонанс в последовательном контуре

Собирают последовательную цепь, состоящую из генератора переменного тока регулируемой частоты, катушки «12 В» от универсального трансформатора, батареи конденсаторов, лампочки от карманного фонаря и двух ключей (рис. 21). Установив частоту генератора 50—60 Гц, замыкают цепь и, меняя емкость батареи, добиваются такой силы тока, при которой лампочка будет едва светиться.

Изменяя частоту вынуждающего напряжения, наблюдают, как постепенно увеличивается яркость свечения лампочки и при некоторой частоте достигает максимального значения. Если в этот момент замкнуть ключ *К2*, свечение лампочки не изменится: она будет светить по-прежнему ярко. Это свидетельствует о том, что сопротивление последовательного контура в момент резонанса очень мало. Разомкнув ключ *К2*, продолжают опыт. При дальнейшем увеличении частоты вынуждающего напряжения свечение лампочки уменьшается и, наконец, нить лампочки перестает светиться.

Опыт. 29. Резонанс в параллельном контуре

К генератору напряжения регулируемой частоты подключают параллельный колебательный контур (катушку «12 В» от универсального трансформатора, батарею конденсаторов), в ветви контура включают лампочки от карманного фонаря, по яркости свечения которых судят о силе тока (рис. 22).

Установив частоту вынуждающего напряжения 30—40 Гц, наблюдают яркое свечение лампочки, включенной в ветвь с катушкой. Лампочка, включенная последовательно с конденсатором, не све-

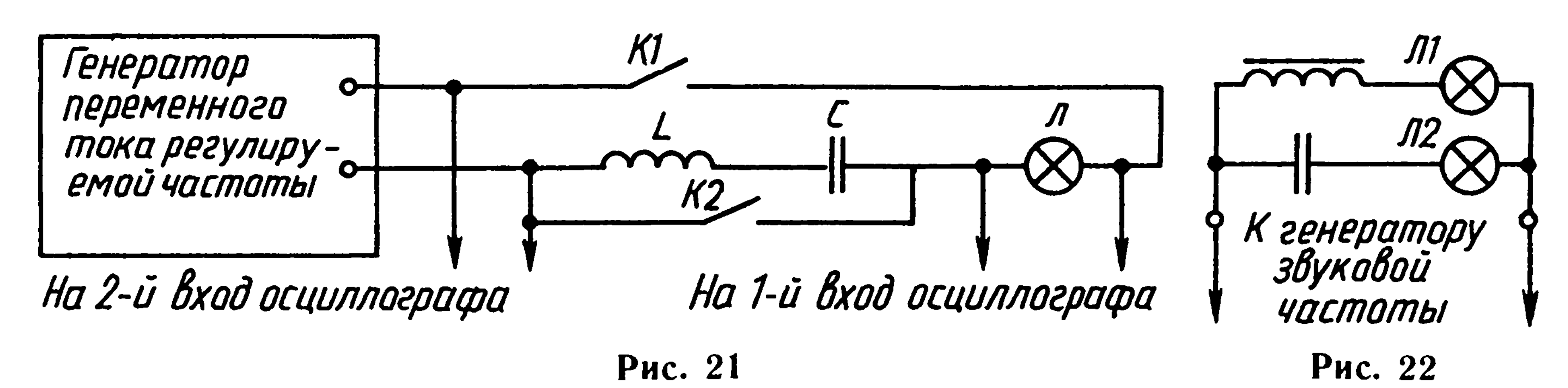


Рис. 21 Рис. 22

тится. Делают вывод, что при малой частоте вынуждающего напряжения сопротивление ветви с конденсатором велико, а сопротивление ветви с катушки мало.

Увеличивая частоту, наблюдают постепенное уменьшение яркости свечения лампочки, включенной в ветвь с катушкой. Лампочка же, включенная последовательно с конденсатором, светится все ярче и ярче. Делают вывод, что с увеличением частоты сопротивление катушки увеличивается, а сопротивление конденсатора, наоборот, уменьшается.

При некоторой частоте ω_p, которую надо заметить, обе лампочки начинают светиться одинаково. Дальнейшее увеличение частоты приводит к тому, что яркость свечения лампочек становится неодинаковой: лампочка в емкостной ветви светит все ярче, а лампочка в индуктивной ветви совсем перестает светиться.

Для исследования явлений в неразветвленной части несколько видоизменяют схему цепи: отключают лампочки в ветвях и включают одну лампочку в неразветвленную часть цепи. Теперь учащиеся наблюдают, что с увеличением частоты сила тока неразветвленной части цепи уменьшается; при частоте, равной той, при которой лампочки горели одинаково ярко, лампочка перестает светиться. При дальнейшем увеличении частоты лампочка начинает светиться вновь.

Это объясняется так. Колебания тока в ветви с конденсатором опережают колебания напряжения на четверть периода, а в ветви с катушкой индуктивности отстают на четверть периода. Поэтому сила тока в неразветвленной части цепи равна разности сил тока в ветвях. Но при резонансе силы тока в ветвях одинаковы, и их разность равна нулю (полное сопротивление контура велико). В неразветвленной части цепи течет небольшой ток, который обеспечивает восполнение энергии в контуре.

Опыты 30—32. Фаза вынужденных колебаний

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 19. Включив вибратор, наблюдают вынуждающие колебания белой пластины и вынужденные колебания черной пластины. Замечают, что при малых частотах пластины движутся с разными амплитудами, но почти в одинаковых фазах. Делают вывод, что при малых частотах фаза вынужденных колебаний почти совпадает с фазой вынуждающих колебаний.

Увеличивают частоту вынуждающих колебаний и замечают, что пластины начинают колебаться не синфазно: появляется сдвиг по фазе между вынужденными колебаниями черной пластины и вынуждающими колебаниями белой.

По мере увеличения частоты вынуждающих колебаний этот сдвиг по фазе растет и при наступлении резонанса достигает $-\frac{\pi}{2}$. При дальнейшем увеличении частоты сдвиг по фазе приближается к $-\pi$.

Учащимся надо разъяснить, что смещение белой пластины совпадает по фазе с вынуждающей силой, так как стержень непосредственно соединен с вибратором. Поэтому если

$$f = F_m \sin \omega t \quad (\text{А}), \text{ то } x_б = X_б \sin \omega t.$$

В момент резонанса $\omega = \omega_0$, а потому

$$f = F_m \sin \omega_0 t \text{ и } x_б = X_б \sin \omega_0 t.$$

Смещение черной пластины, совершающей вынужденные колебания, в момент резонанса происходит с опозданием по фазе на $-\frac{\pi}{2}$:

$$x = X_m \sin\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right) = -X_m \cos \omega_0 t,$$

а ее скорость $v = v_m \sin \omega_0 t$ (В).

Таким образом, при резонансе в течение каждого периода направление вынуждающей силы (А) совпадает с направлением скорости вынужденных колебаний (В).

Так как силы трения $f_{тр} = -\mu v$, то

$$f_{тр} = -\mu v = -\mu v_m \sin \omega_0 t = -F_{тр\,m} \sin \omega_0 t.$$

Из того факта, что после наступления резонанса амплитуда вынужденных колебаний больше не растет, следует, что в момент резонанса работа вынуждающей силы равна (по модулю) отрицательной работе сил трения. Таким образом, в момент резонанса вынуждающая сила компенсирует силы трения, а маятник совершает колебания за счет энергии, накопленной за время до достижения резонанса. При этом потенциальная энергия сжатой пружины преобразуется в кинетическую энергию черной пластины, а последняя преобразуется в потенциальную энергию сжатой пружины и т. д.

2. Для наблюдения фазовых соотношений при резонансе в последовательном контуре собирают цепь, показанную на рисунке 21. В этой установке в качестве катушки индуктивности можно использовать любую катушку от универсального трансформатора, батарею конденсаторов и в качестве индикатора тока — лампочку от карманного фонаря. Необходимая емкость подбирается в ходе подготовки опыта в зависимости от напряжения звукового генератора.

На первый вход осциллографа подается напряжение с зажимов лампочки от карманного фонаря; оно пропорционально силе тока, протекающего через лампочку ($U_R = iR$). На второй вход — напряжение с зажимов звукового генератора ($U_г$). Медленно меняя

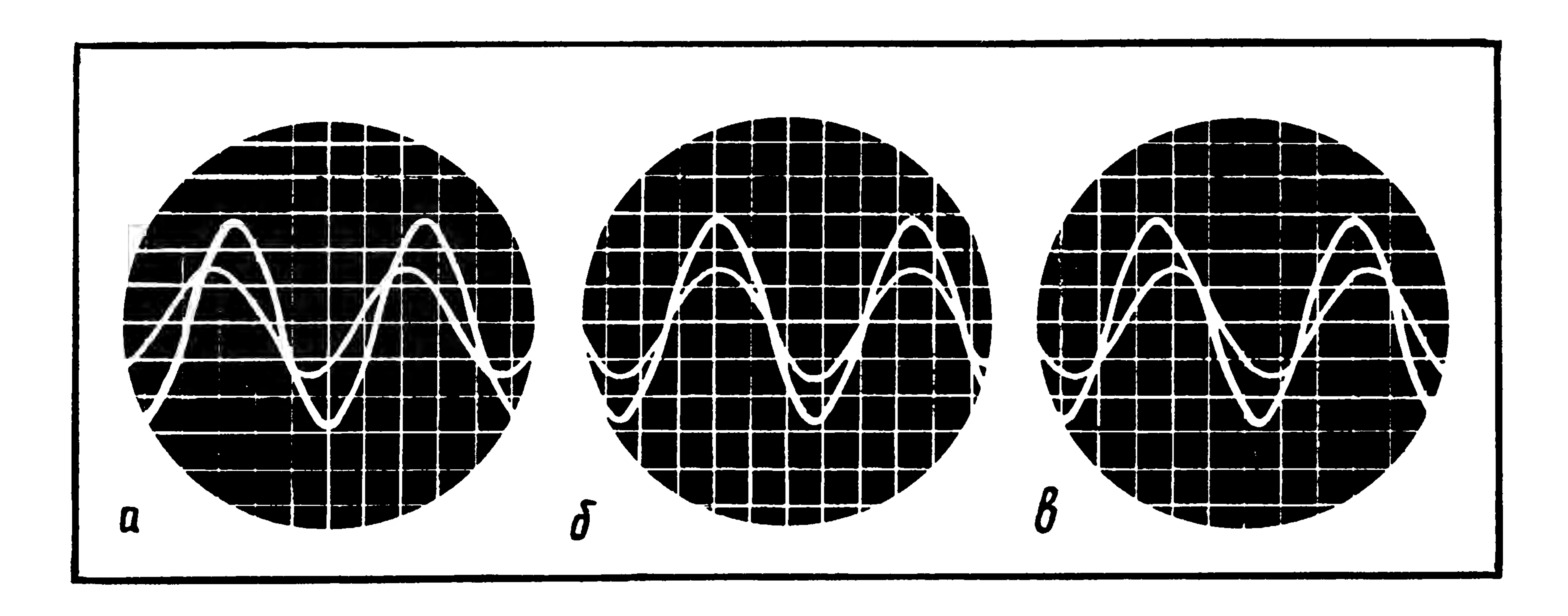


Рис. 23

частоту колебаний напряжения генератора, отмечают, что при низкой частоте колебаний имеется заметная разность фаз между колебаниями силы тока и колебаниями напряжения (рис. 23, *а*). По мере увеличения частоты вынуждающего напряжения этот сдвиг уменьшается, а амплитуда осциллограммы силы тока растет (при постоянной амплитуде осциллограммы напряжения).

Наконец, при некоторой частоте $\omega_р$ осциллограммы тока и напряжения совпадут по фазе. В этот момент лампочка светит ярко, а амплитуда осциллограммы тока наибольшая (рис. 23, *б*).

При дальнейшем увеличении частоты вынуждающего напряжения вновь появляется постепенно растущая разность фаз, лампочка светит все менее ярко, а амплитуда осциллограммы силы тока уменьшается (рис. 23, *в*).

Объясняют, что поскольку в момент резонанса амплитуда колебаний силы тока не растет, то энергия, поступающая в контур от генератора, идет на нагревание контура (а в опыте и лампочки). Следовательно, в момент резонанса в контуре происходят свободные колебания, при которых энергия электрического поля конденсатора преобразуется в энергию магнитного поля катушки, а энергия магнитного поля катушки — вновь в энергию электрического поля конденсатора и т. д.

3. Если в школе нет двулучевого осциллографа, совпадение фаз колебаний напряжения и силы тока можно показать на однолучевом осциллографе. Для этого отключают горизонтальную развертку, а клеммы горизонтальной развертки используют в качестве второго входа осциллографа (рис. 24, *а*). Включив звуковой генера-

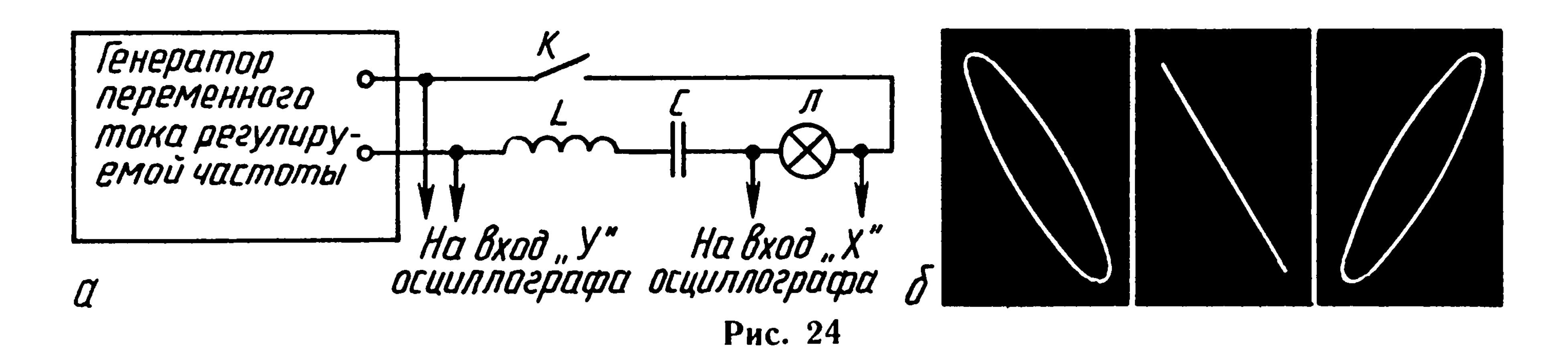


Рис. 24

тор, замечают, что на его экране появился эллипс. Это свидетельствует о сдвиге фаз между колебаниями напряжения и силы тока (рис. 24, *б*). Плавно изменяя частоту вынуждающего напряжения, замечают постепенное сплющивание эллипса. В момент резонанса эллипс превращается в наклонную прямую, что свидетельствует о совпадении фаз колебаний напряжения и силы тока. При дальнейшем увеличении частоты вынуждающего напряжения вновь появляется эллипс, наклоненный в другую сторону.

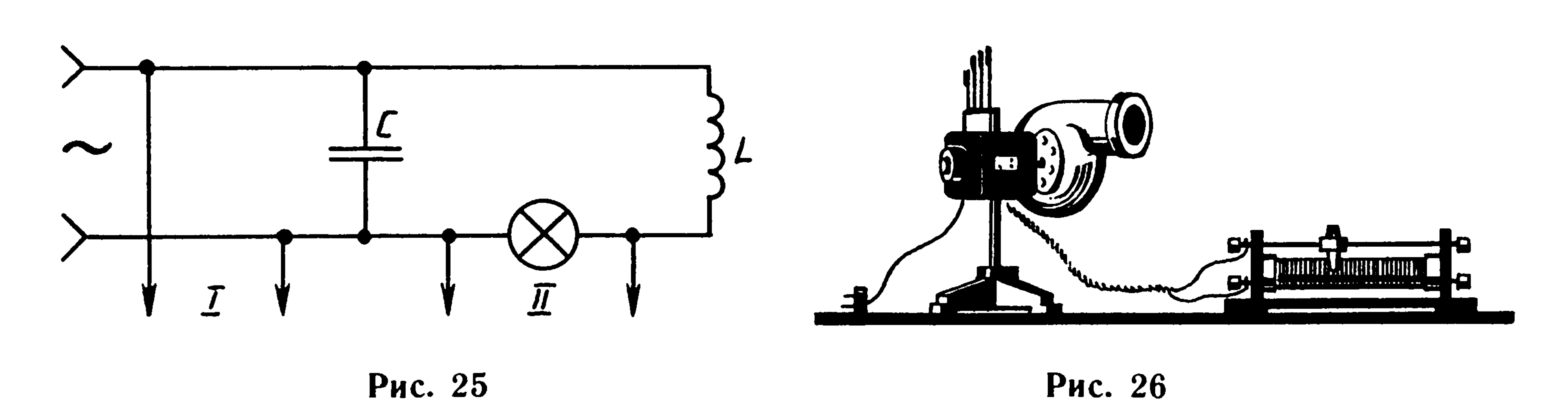


Рис. 25 **Рис. 26**

4. Для наблюдения фазовых соотношений в параллельном контуре собирают цепь, схема которой приведена на рисунке 25, и проводят опыт в последовательности, описанной выше. В установке использованы приборы, названные при описании опыта 30.

Опыт 33. Устройство и принцип работы язычкового частотомера

Укрепив модель частотомера на универсальном двигателе (рис. 26), включают двигатель в сеть через реостат. Увеличивая быстроту вращения двигателя, а следовательно, и частоту вибрации, замечают, что сначала резонирует один из язычков, затем другой, третий и, наконец, четвертый. Учащимся поясняют, что язычки частотомера — это колебательные системы с большой добротностью. В противном случае явление резонанса не было бы отчетливо выражено и измерения частоты не были бы точными.

Включают язычковый частотомер «В 80» в сеть переменного тока. Учащиеся убеждаются в том, что резонирует язычок с частотой свободных колебаний 50 Гц. Устройство частотомера объясняют с помощью схематического рисунка на классной доске.

Опыт 34*. Устройство и принцип работы резонансного анализатора спектров

Рассказывают учащимся о том, что при изучении колебательных процессов часто бывает необходимо определить спектральный состав сигнала.

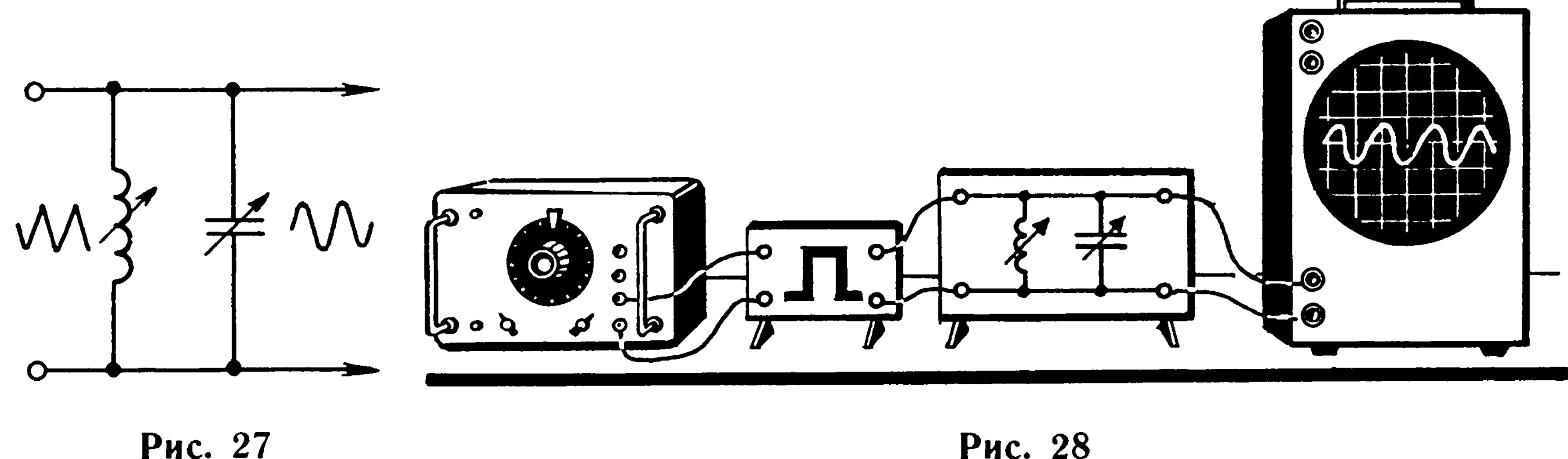


Рис. 27 Рис. 28

Простейшим анализатором электромагнитных колебаний может служить перестраиваемый колебательный контур с достаточно большой добротностью. На доске рисуют схему последовательного анализатора спектров (рис. 27). На вход перестраиваемого контура подается исследуемый периодический сигнал, а на выход включают индикатор, которым может служить осциллограф.

По схеме собирают демонстрационную установку, состоящую из генератора П-образных импульсов, питаемого от звукового генератора, перестраиваемого контура и осциллографа (рис. 28). Включают приборы в сеть и, установив частоту звукового генератора 400 Гц, меняя емкость контурного конденсатора при постоянной индуктивности катушки, выделяют гармоники.

Постоянные конденсаторы подобраны так, что позволяют грубо выделить первую, вторую, третью и четвертую гармоники; изменением емкости переменного конденсатора добиваются более четкого выделения этих гармоник. На экране осциллографа наблюдают синусоиды с кратными частотами.

Заменяют генератор П-образных импульсов генератором пилообразных импульсов или однополупериодным выпрямителем (без фильтра) и определяют гармонический состав соответствующих сигналов.

Опыты 35—37. Способы борьбы с резонансными явлениями

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 16. Включив вибратор, добиваются резонансных колебаний маятника. Обращают внимание на то, что эти колебания могут иметь разрушительный характер. Существуют различные способы борьбы с резонансом. Основной из них состоит в изменении частоты свободных колебаний системы, с тем чтобы она не совпадала с частотой вынуждающих колебаний. Для иллюстрации этого способа кладут в стакан маятника дополнительный груз и замечают, что амплитуда колебаний маятника резко уменьшается.

2. Другой способ заключается в увеличении трения системы. Вынув дополнительный груз из стакана маятника, вновь наблюдают резонансные колебания. Ввернув механический демпфер в рабочее положение, замечают уменьшение амплитуды вынужденных колебаний (см. рис. 12).

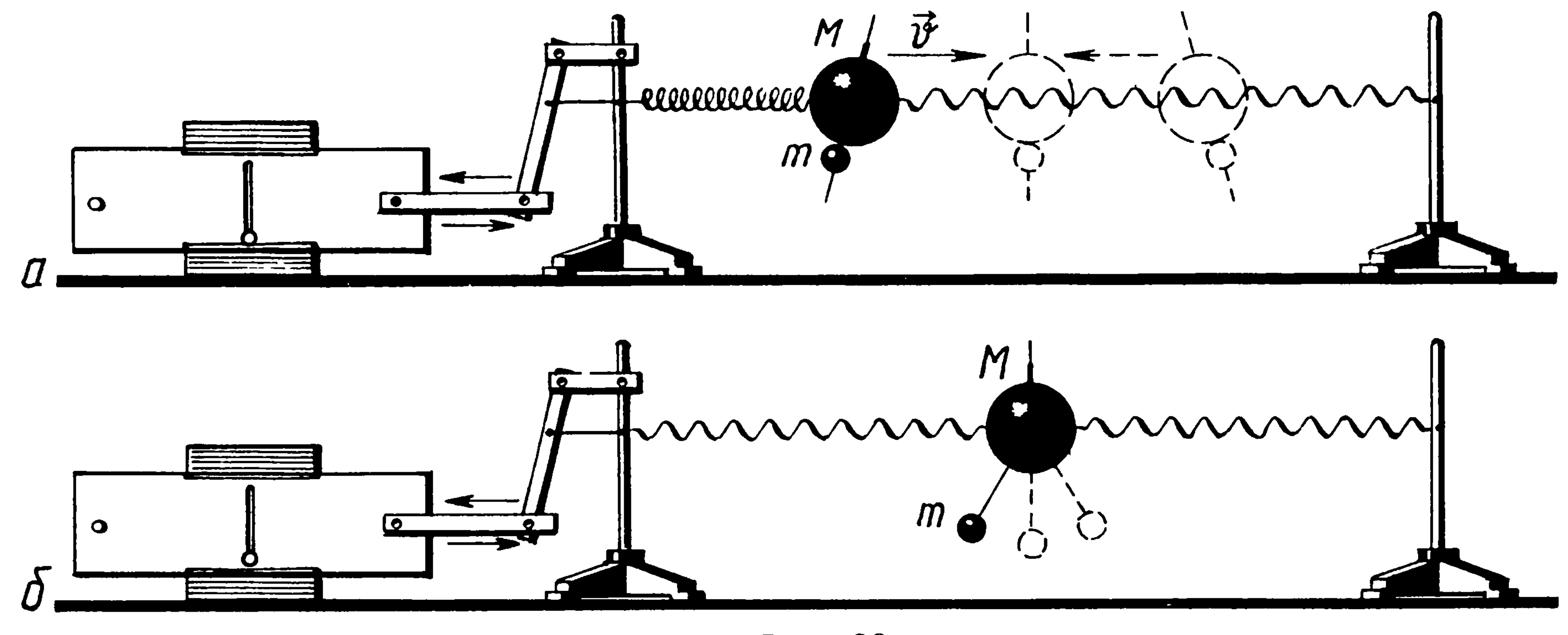


Рис. 29

3. В некоторых случаях применяют специальные устройства для гашения резонансных колебаний. Представление об этом даст учащимся следующий опыт.

К пружинному маятнику M с помощью винта прикрепляют стальную пластину, по которой может перемещаться груз m (рис. 29). В нижнем положении груз m и стальная пластина образуют колебательную систему, частота свободных колебаний которой равна частоте свободных колебаний пружинного маятника.

Подняв груз m в верхнее положение, включают вибратор и, изменяя напряжение на двигателе вибратора, добиваются резонансных колебаний маятника. Не выключая вибратор и не изменяя частоту его колебаний, рукой останавливают маятник M и опускают груз m в нижнее положение. Отпустив маятник M, наблюдают, что он почти не колеблется, а груз m совершает колебания с изменяющейся амплитудой (биения).

Сообщают, что с помощью специальных поглотителей гасят механические резонансные колебания проводов на линиях электропередачи. Для этого к проводам линии вблизи опорных изоляторов прикрепляют небольшие подвески в форме гантелей.

§ 5. Переменный ток как вынужденные колебания

Методику изложения в школе материала о свойствах переменного тока с позиций единого подхода к изучению колебательных явлений впервые предложил А. А. Пинский в своей работе «Изучение переменного тока в курсе физики средней школы».— М., 1958. Этот подход не только облегчает изучение свойств и цепей переменного тока, но и, что не менее важно, создает необходимую полноту в изучении колебательных и волновых процессов и тем самым готовит учащихся к изучению явлений, имеющих место в быстропеременных электромагнитных явлениях. Описанные ниже опыты соответствуют такому подходу к изучению переменного тока.

Для постановки большинства описанных опытов необходим генератор переменного тока регулируемой частоты. В качестве такого

генератора весьма удобен школьный звуковой генератор. Он позволяет в широких пределах регулировать частоту тока, дает напряжение синусоидальной формы и постоянное напряжение. Мощность генератора (при использовании тех приемников, которые необходимы в опытах) вполне достаточна для эффектной демонстрации изучаемых явлений.

Большие трудности приходится преодолевать учителям при постановке тех опытов, в ходе которых необходимо производить измерения силы тока, напряжения и мощности в цепях переменного тока. Школьные универсальные демонстрационные амперметр и вольтметр магнитоэлектрической системы с выпрямителем и одно время выпускавшийся ваттметр электромагнитной системы хотя по их описанию и могут использоваться для измерения в цепях переменного тока, но их показания весьма приблизительны и не обеспечивают необходимой точности.

В поисках выхода один из авторов этого пособия 25 лет тому назад приспособил для демонстрационных опытов выпускавшиеся тогда промышленностью амперметр и вольтметр типа Д-170 и ваттметр типа Д-174. Эти слегка модернизированные приборы прошли всестороннюю проверку в школе № 215 Москвы.

В описанных ниже опытах фигурируют модернизированные приборы серии Д. Небольшое число дополнительных приспособлений, используемых при постановке опытов, может быть легко изготовлено на занятиях физико-технического кружка силами учащихся. Необходимые указания по их изготовлению даны в разделе III (§ 17).

Опыт 38. Устройство и принцип работы индукционного генератора

Цель опыта — показать, что при равномерном вращении проводящей рамки в однородном магнитном поле в ней возникает переменное электромагнитное поле, электродвижущая сила которого изменяется по закону гармонического колебания.

Собирают установку, изображенную на рисунке 30. Напоминают учащимся, что между кольцами Гельмгольца образуется прак-

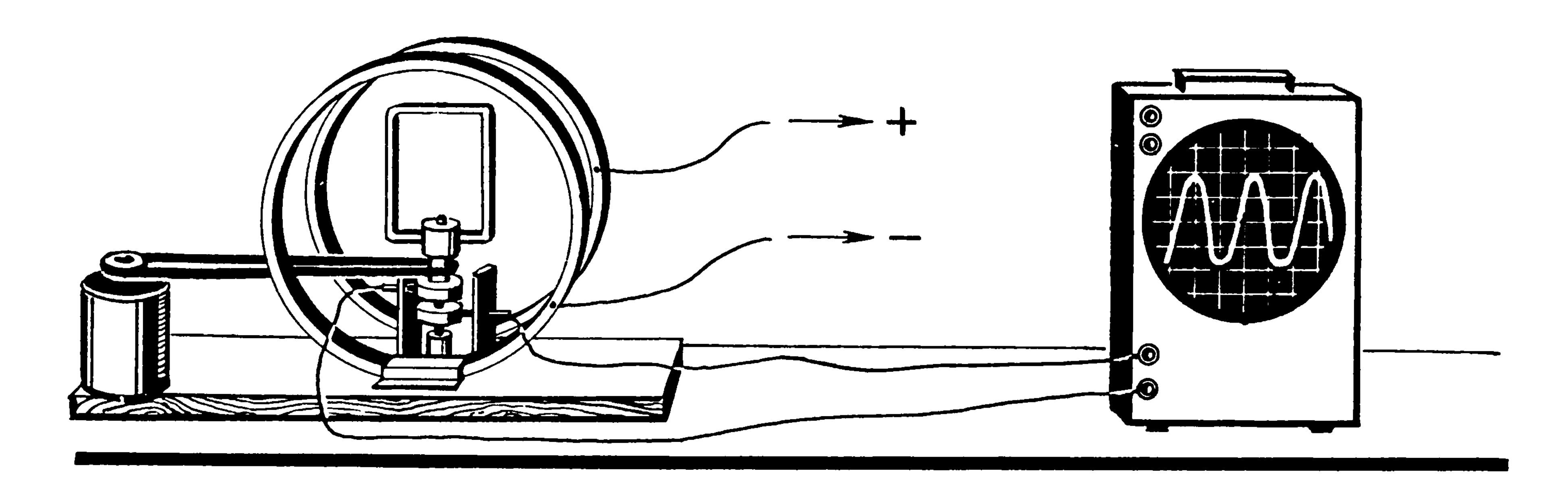


Рис. 30

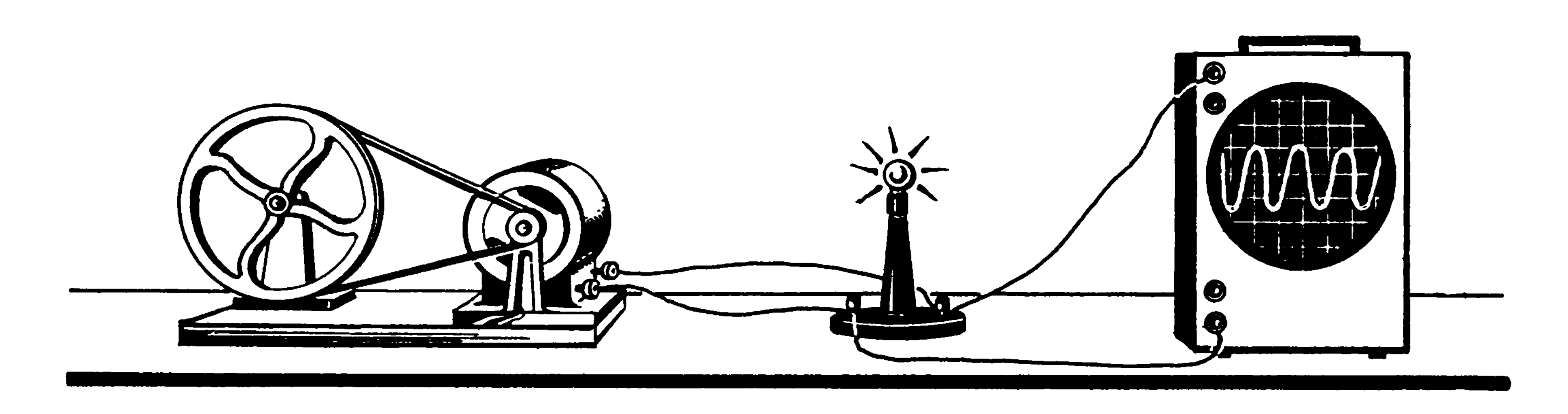


Рис. 31

тически однородное поле. (Кольца Гельмгольца берут от прибора для демонстрации движения электронов в магнитном поле.) Показывают учащимся рамку, кольца и щетки для снятия тока из рамки.

Устанавливают рамку в магнитном поле. Включив двигатель, приводящий рамку во вращение, наблюдают на экране осциллографа осциллограмму, очень близкую по форме к синусоиде.

Опыт 39. Конструкции индукционных генераторов

Объясняя устройство генератора, демонстрируют учащимся статор демонстрационного генератора, показывают магнитопровод, пазы в магнитопроводе и обмотку, уложенную в пазы. Затем показывают ротор генератора, магнитное поле которого создается постоянным магнитом. Разъясняют учащимся, что форма зазора между статором и ротором специально рассчитывается таким образом, чтобы при вращении ротора магнитная индукция в зазоре изменялась по закону косинуса:

$$b = B_m \cos \omega t.$$

Обращают внимание учащихся на то, что в учебной модели форма зазора подобрана плохо — это приводит к тому, что ЭДС индуцированного поля изменяется не по гармоническому закону.

Собирают установку, изображенную на рисунке 31. Вращают ротор и наблюдают свечение лампочки. Осциллограмма свидетельствует о том, что в статоре возникает переменная ЭДС, по форме близкая к синусоидальной.

Увеличив скорость вращения ротора, замечают изменение частоты переменного тока и амплитудного значения ЭДС.

Собирают установку, изображенную на рисунке 32.

Объясняют, что в этом случае магнитное поле ротора создается электромагнитом. Меняя ток возбуждения, показывают, что максимальная ЭДС пропорциональна магнитной индукции.

Опыт 40. Некоторые свойства переменного тока

1. К генератору звуковой частоты подключают лампочку, рассчитанную на напряжение 1 В (0,068 А). Установив частоту 20 Гц,

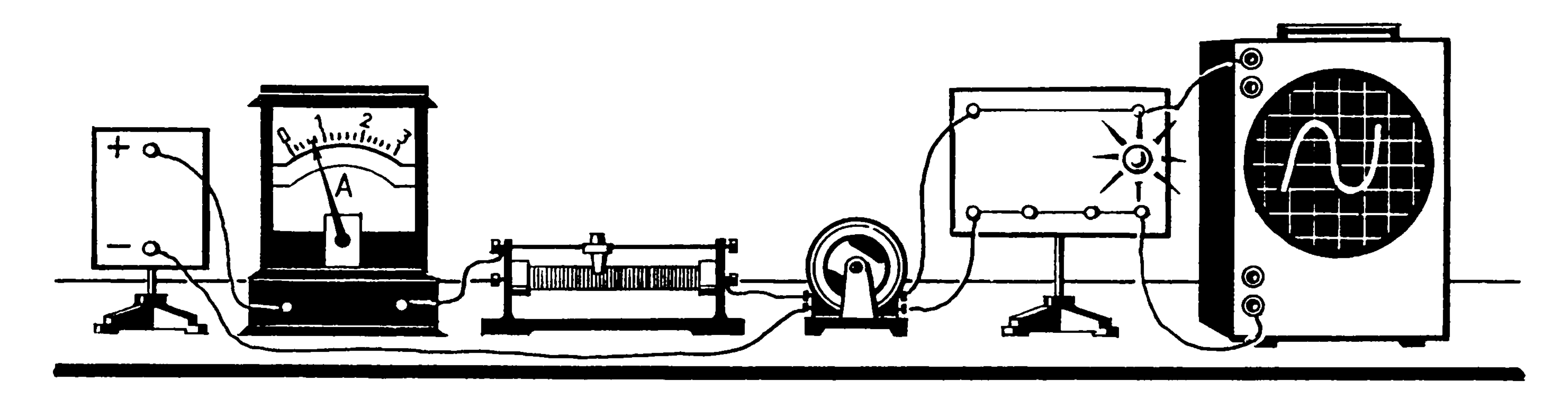


Рис. 32

наблюдают мигание лампочки. Увеличив частоту, замечают, что мигания стали незаметны. Объясняют наблюдаемое явление.

2. Неоновую лампочку сначала включают в сеть переменного тока и наблюдают свечение обоих электродов. Затем эту же лампочку включают в цепь постоянного тока. Наблюдают свечение только одного электрода.

3. Демонстрационный электромагнит подключают к генератору звуковой частоты. Вблизи электромагнита располагают стальную линейку, зажатую в тиски (см. рис. 17). Меняя частоту переменного тока, питающего обмотку электромагнита, добиваются резонансных колебаний пластины. Для успеха и выразительности опыта существенно важно до урока подобрать длину пластины.

Опыт 41. Введение понятия об активном сопротивлении

Собирают электрическую цепь из электрического утюга, амперметра, вольтметра и ваттметра. Подключив цепь к источнику постоянного тока, замечают, что мощность, показываемая ваттметром, равна мощности, найденной как произведение силы тока на напряжение (рис. 33).

Повторяют опыт, подключив цепь к источнику переменного тока, и наблюдают аналогичную картину.

Обсуждая результаты опыта, приходят к выводу, что в такой цепи вся подводимая к нагрузке электрическая энергия необратимо превращается в другие виды энергии.

Сообщают, что нагрузка, при которой вся подводимая к ней от генератора электрическая энергия необратимо превращается в

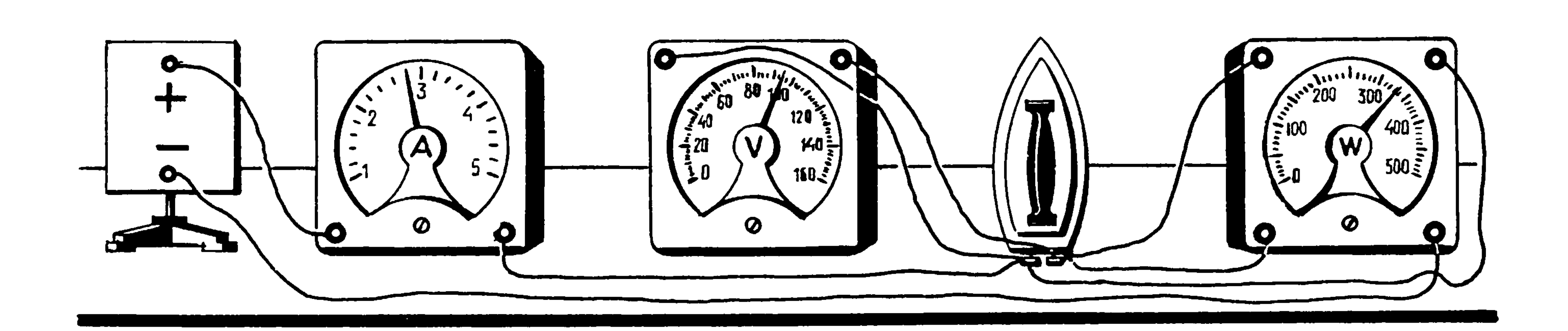


Рис. 33

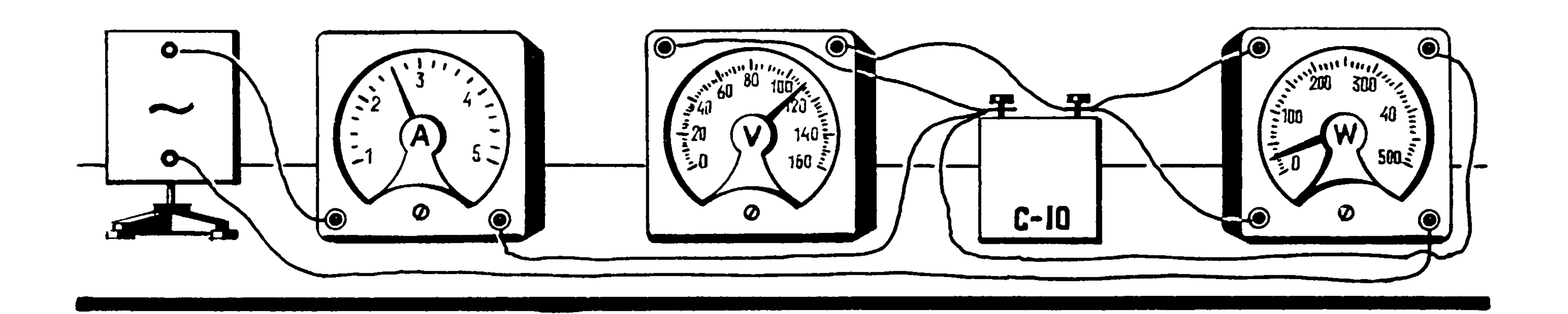


Рис. 34

другие виды энергии, называется активной, а ее сопротивление — активным сопротивлением.

Однако не всякая нагрузка превращает подводимую к ней энергию в другие виды. Для того чтобы показать учащимся, что такая нагрузка существует, заменяют утюг батареей конденсаторов (рис. 34). Увеличивая емкость батареи, устанавливают в цепи силу тока 2—3 А и наблюдают, что стрелка ваттметра стоит почти на нуле. Убеждаются в исправности ваттметра. Для этого, отключив конденсаторы, включают вместо них лампу накаливания и наблюдают отклонение стрелки ваттметра.

Обсуждая опыт, делают вывод, что батарея конденсаторов не преобразует подводимой электрической энергии в другие виды (мощность равна нулю), хотя в цепи и циркулирует значительный ток. Сообщают, что такая нагрузка называется реактивной.

Заменив батарею конденсаторов двигателем, демонстрируют, что преобразуемая в цепи энергия зависит от нагрузки на двигатель. Следовательно, активное сопротивление в этом случае — величина переменная.

Опыт 42*. Ознакомление с принципом работы электронного переключателя

Электронный переключатель (его описание дано в § 16) — вспомогательный прибор, и его изучение не входит в программу средней школы. Однако учащиеся должны знать функциональное назначение переключателя и иметь хотя бы элементарные сведения о принципе его работы (конечно, без рассмотрения схемы).

На вертикальный вход электронного осциллографа подключают переключатель и замечают, что сплошная светлая полоса на экране осциллографа разделилась на две штриховые, которые по желанию можно сдвигать и раздвигать.

На первый вход электронного переключателя подают переменное напряжение из сети и наблюдают осциллограмму. Затем на второй вход переключателя подают напряжение от звукового генератора. На экране осциллографа появляется вторая кривая (рис. 35). Объясняют, что электронный переключатель подключает к входу осциллографа то один, то другой сигнал и делает это с большой частотой. Таким образом, однолучевой осциллограф превращается как бы в двулучевой.

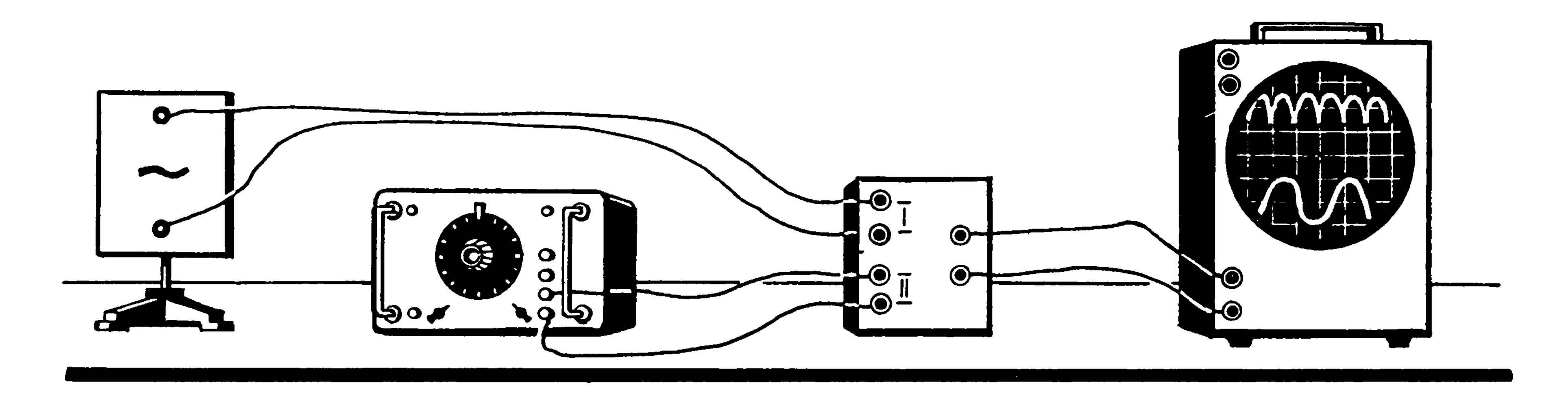


Рис. 35

Опыт 43*. Фазовые соотношения в цепи с активным сопротивлением

Совпадение по фазе колебаний силы тока и напряжения в цепи с активным сопротивлением не может быть доказано экспериментально, если пользоваться приборами одной какой-либо системы. Это объясняется тем, что электромагнитный осциллограф и измерительные приборы всех систем, за исключением электростатической, реагируют на ток, а электронный осциллограф и приборы электростатической системы — на напряжение. Следовательно, будучи включенными в цепь переменного тока, эти приборы будут показывать совпадение фаз либо сил тока на различных участках цепи, либо напряжений.

Поэтому фазовые соотношения в цепи переменного тока лучше всего установить, исходя из анализа механизма возникновения вынужденных колебаний электронов в проводниках.

Установленную аналитически зависимость (справедливость закона Ома для мгновенных значений силы тока и напряжения) можно проиллюстрировать с помощью опытов. Совпадение результатов наблюдений с аналитически установленной закономерностью весьма важно, так как в этом случае получают экспериментальный метод изучения фазовых соотношений в цепи переменного тока с емкостью и индуктивностью.

Чтобы показать совпадение по фазе колебаний силы тока и напряжения с помощью электронного осциллографа, собирают цепь, изображенную на рисунке 36.

На экране наблюдают осциллограмму силы тока, совпадающую по фазе с осциллограммой напряжения. Меняя с помощью реостата сопротивление цепи, наблюдают изменение амплитуды силы тока, что, однако, не ведет к нарушению фазовых соотношений.

Совпадение фаз колебаний силы тока и напряжения можно также проиллюстрировать с помощью стрелочных приборов: вольтметра электростатической системы и амперметра электромагнитной системы, если цепь подключить к генератору инфразвуковой частоты. Однако не во всех школах есть электростатические вольтметры на низкое напряжение, что затрудняет постановку этого простого и весьма наглядного опыта.

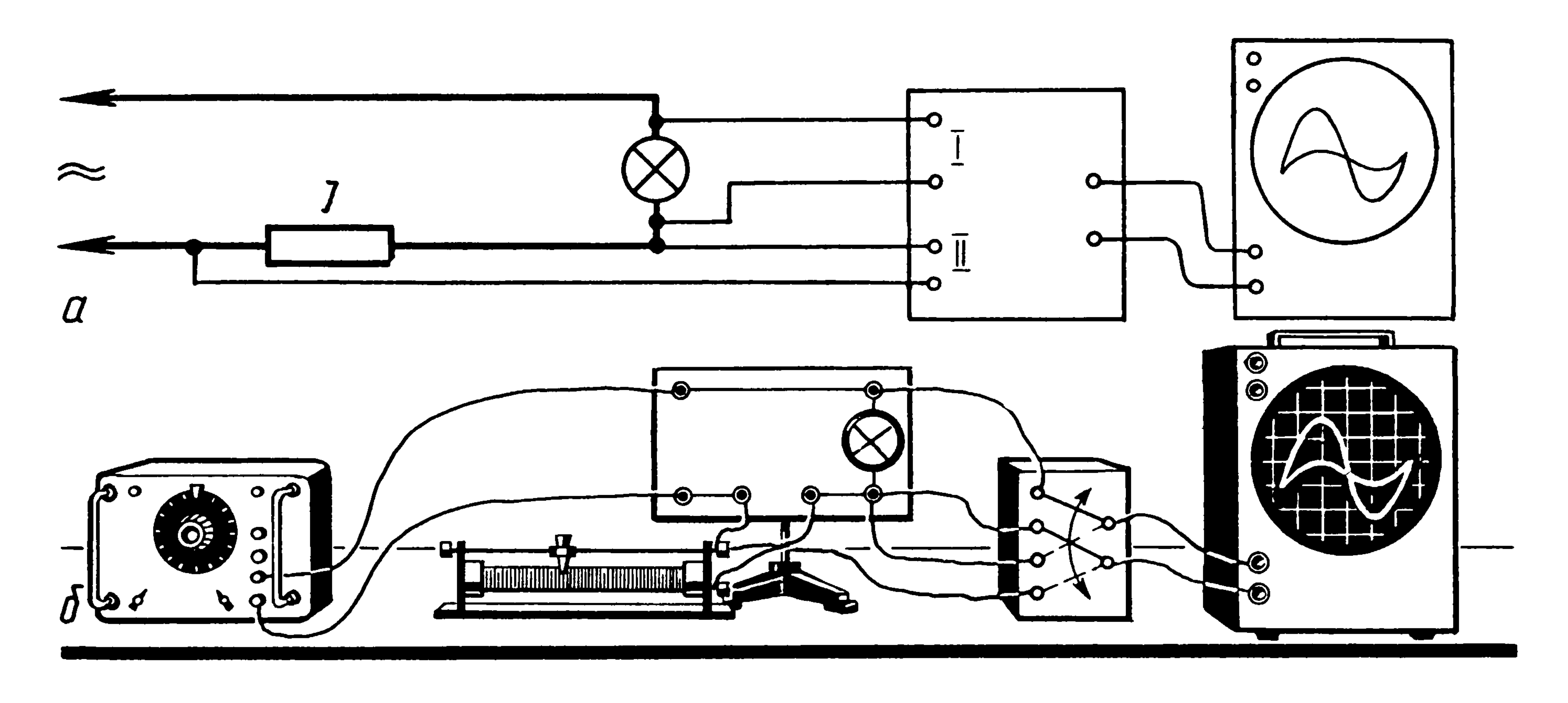


Рис. 36

Опыт 44. Закон Ома для цепи с активным сопротивлением

Собирают цепь, изображенную на рисунке 36. Включив ток, наблюдают совпадающие по фазе колебания напряжения и силы тока.

Увеличивают с помощью регулятора напряжения амплитуду напряжения. Замечают, что одновременно увеличивается и амплитуда силы тока. Делают вывод, что для мгновенных и амплитудных значений силы тока и напряжения справедлив закон Ома.

Вместо электронного коммутатора и осциллографа подключают демонстрационные вольтметр и амперметр. Обращают внимание учащихся на то, что они показывают действующие значения силы тока и напряжения.

Увеличивая напряжение, замечают одновременное увеличение силы тока. Делают вывод, что закон Ома в цепи переменного тока справедлив и для действующих значений.

Обобщая результаты опытов, делают заключение, что в цепи с активным сопротивлением закон Ома справедлив для амплитудных, мгновенных и действующих значений силы тока и напряжения.

Опыт 45. Демонстрация емкостного сопротивления

Лампочку от карманного фонаря присоединяют последовательно с батареей конденсаторов к аккумуляторной батарее. Замыкая цепь, наблюдают, что лампочка не горит, какое бы значение емкости мы ни брали. Замыкают конденсатор накоротко, убеждаются в исправности лампочки и батареи аккумуляторов. На основании опыта делают вывод, что в цепи с конденсатором постоянный ток невозможен.

Отсоединяют собранную цепь от батареи аккумуляторов и присоединяют к источнику переменного тока такого же напряжения,

лампочка при этом светится. Присоединяют параллельно лампочке осциллограф (рис. 37) и убеждаются, что в цепи с конденсатором возникают незатухающие электромагнитные колебания (переменный ток), как и в цепи с активным сопротивлением.

Замыкают батарею конденсаторов накоротко и наблюдают более яркое свечение лампочки. Делают вывод, что конденсатор в цепи переменного тока является сопротивлением. Сообщают учащимся, что сопротивление, оказываемое переменному току конденсатором, называют емкостным и обозначают X_C.

Увеличивают емкость включенной части батареи конденсаторов и наблюдают увеличение яркости свечения лампочки и амплитуды колебаний на экране осциллографа. Уменьшая емкость, наблюдают уменьшение яркости и амплитуды осциллограммы. Делают вывод, что емкостное сопротивление обратно пропорционально емкости:

$$X_C \sim \frac{1}{C}.$$

Увеличивая частоту переменного тока, наблюдают увеличение яркости свечения лампочки, а при снижении — уменьшение. Делают вывод, что емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте:

$$X_C \sim \frac{1}{\omega}.$$

Объединяют результаты наблюдений и записывают, что

$$X_C \sim \frac{1}{C\omega},$$

после чего переходят к знаку равенства:

$$X_C = k\frac{1}{C\omega}.$$

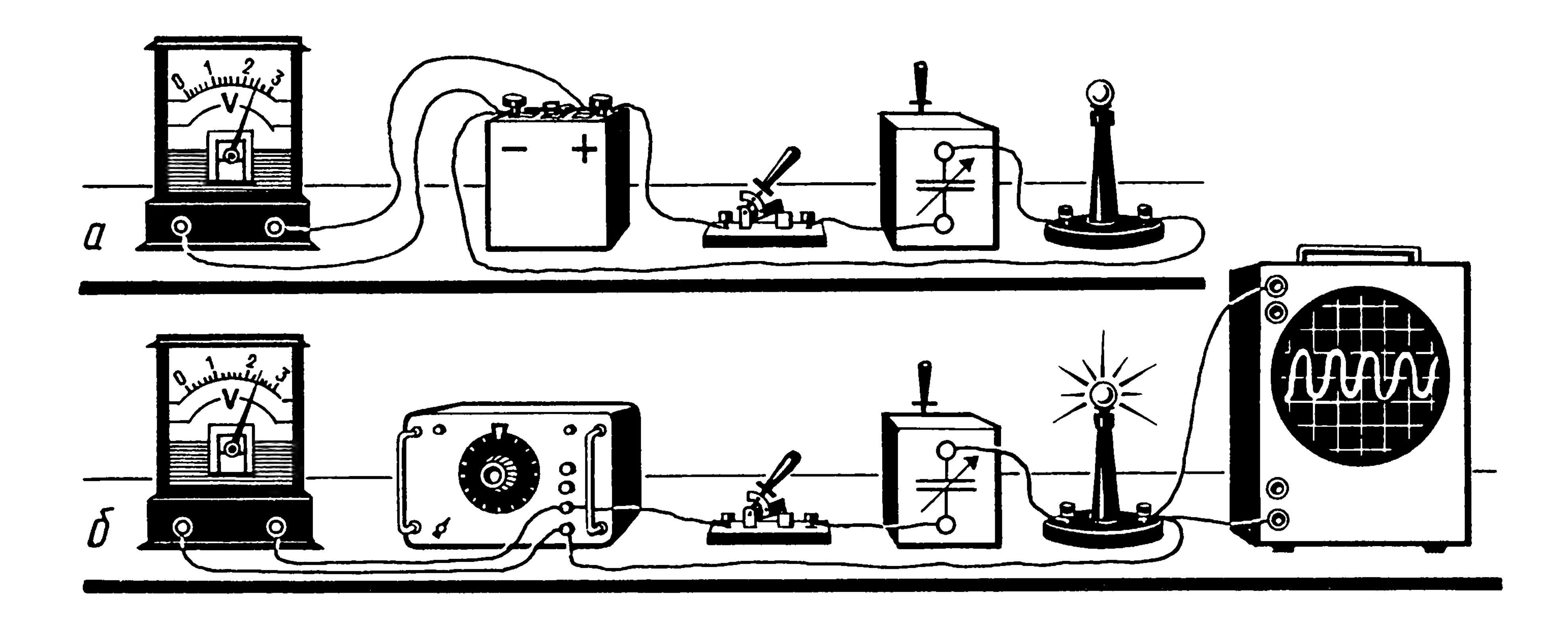


Рис. 37

Коэффициент пропорциональности при пользовании одной системой единиц для измерения X_C, C и ω равен единице, поэтому

$$X_C = \frac{1}{C\omega}.$$

Опыт 46*. Фазовые соотношения в цепи переменного тока, содержащей батарею конденсаторов

Собирают установку, изображенную на рисунке 38. Замыкают цепь и наблюдают на экране осциллографа две синусоидальные кривые. Меняя емкость батареи конденсаторов, отмечают изменение яркости свечения лампочки (которая, по существу, является индикатором тока) и изменение амплитуды одной из кривых, в то время как амплитуда второй кривой не изменяется. Это свидетельствует о том, что первая кривая — кривая силы тока, а вторая — напряжения. Обращают внимание на то, что кривая силы тока лежит левее кривой напряжения примерно на четверть периода. Исходя из этого делают вывод о том, что фаза колебаний силы тока опережает фазу колебаний напряжения.

Следовательно, если $u = U_m \sin \omega t$, то $i = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Опыт 47*. Закон Ома для цепи переменного тока, содержащей батарею конденсаторов

Собирают установку, показанную на рисунке 38. Замыкают ключ и наблюдают на экране осциллографа осциллограммы силы тока и напряжения. Воспроизводя осциллограмму на доске, обращают внимание учащихся на то, что закон Ома для цепи, содержащей батарею конденсаторов, несправедлив для мгновенных значений силы тока и напряжения.

Изменяют напряжение и отмечают, что при увеличении или уменьшении его амплитуды соответственно увеличивается или уменьшается амплитуда силы тока. Следовательно, закон Ома справедлив для амплитудных значений силы тока и напряжения:

$$I_m = \frac{U_m}{X_C}.$$

Рис. 38

Заменив амплитудные значения силы тока и напряжения через действующие, показывают справедливость закона Ома для действующих значений:

$$I = \frac{U}{X_C}.$$

Опыт 48. Демонстрация индуктивного сопротивления

Лампочку от карманного фонаря присоединяют последовательно с катушкой от универсального трансформатора к батарее аккумуляторов. Лампочка ярко светится. Надевая катушку на магнитопровод, убеждаются, что изменение ее индуктивности не влияет на силу тока, проходящего через катушку.

Отсоединяют цепь от батареи аккумуляторов и присоединяют ее к источнику переменного тока (рис. 39) такого же напряжения, что и батарея. Повторяют опыт и наблюдают, что изменение индуктивности влияет на силу тока, проходящего через катушку. Замкнув магнитопровод якорем, замечают, что лампочка перестает светиться. Замыкают катушку накоротко и вновь наблюдают яркое свечение лампочки. Делают вывод, что катушка в цепи переменного тока обладает, кроме сопротивления, определяемого по формуле $R = \rho \frac{l}{S}$, еще дополнительным сопротивлением, которое называют индуктивным и обозначают X_L. Из проделанного опыта следует, что индуктивное сопротивление зависит от индуктивности:

$$X_L \sim L.$$

Присоединяют параллельно катушке осциллограф. Постепенно отодвигая якорь магнитопровода (уменьшая индуктивность катушки), добиваются яркого свечения лампочки.

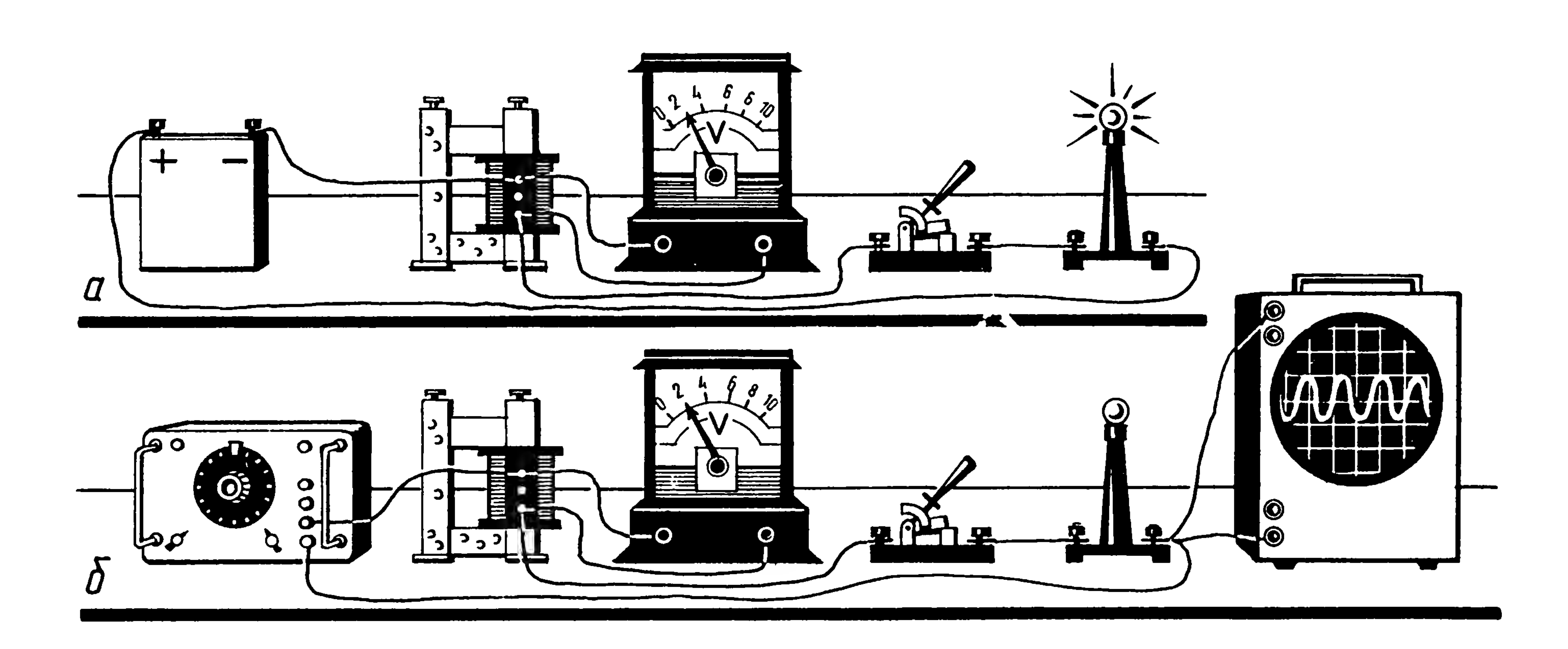


Рис. 39

Увеличивают частоту переменного тока и наблюдают уменьшение яркости свечения лампочки; при уменьшении частоты яркость увеличивается. Из опыта делают вывод о прямой зависимости индуктивного сопротивления от частоты переменного тока:

$$X_L \sim \omega.$$

Объединяя результаты наблюдений, записывают, что

$$X_L \sim L\omega, \text{ или } X_L = kL\omega.$$

При пользовании одной системой единиц для измерения индуктивного сопротивления, индуктивности и частоты коэффициент k становится равным единице, и тогда $X_L = L\omega$.

Опыт 49*. Фазовые соотношения в цепи переменного тока, содержащей катушку индуктивности

Собирают установку, изображенную на рисунке 40. Замыкают цепь и наблюдают на экране осциллографа две синусоидальные кривые. Меняя индуктивность катушки, отмечают изменение яркости свечения лампочки. Одновременно наблюдают изменение амплитуды одной из кривых, в то время как амплитуда второй кривой не изменяется. Это говорит о том, что первая кривая — кривая силы тока, а вторая — напряжения.

Обращают внимание учащихся на то, что кривая силы тока лежит правее кривой напряжения примерно на четверть периода. Делают вывод о том, что фаза колебаний напряжения опережает фазу колебаний силы тока. Следовательно, если

$$u = U_m \sin \omega t, \text{ то } i = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Опыт 50*. Закон Ома для цепи переменного тока, содержащей катушку индуктивности

Собирают установку, изображенную на рисунке 40. Замыкают цепь и наблюдают на экране осциллографа осциллограммы силы тока и напряжения.

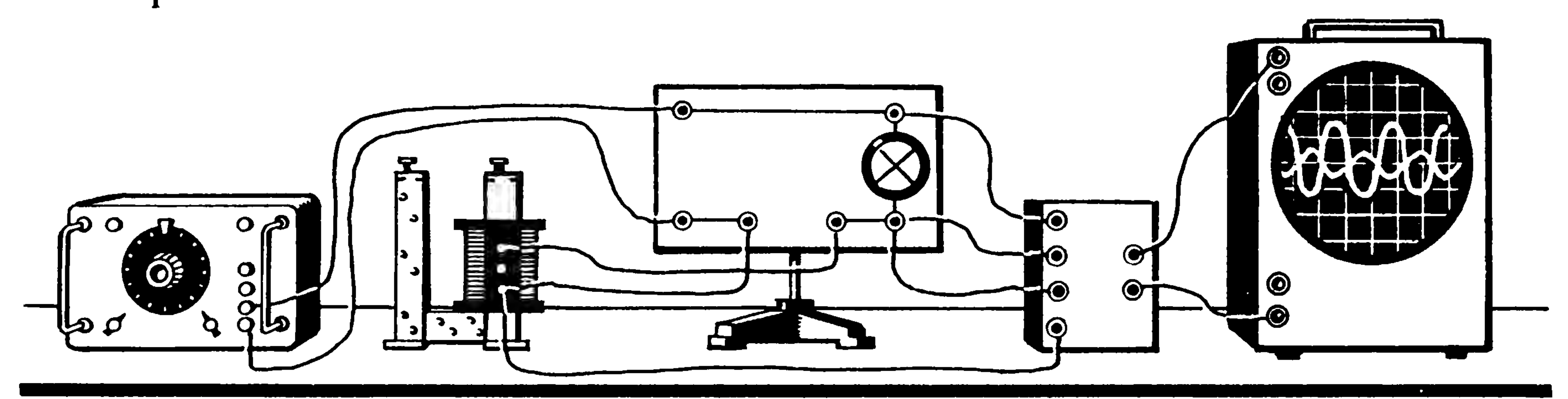


Рис. 40

Воспроизведя осциллограммы на доске, обращают внимание учащихся на то, что закон Ома в цепи с индуктивностью несправедлив для мгновенных значений силы тока и напряжения, что существенно отличает цепь с индуктивностью от цепи с активным сопротивлением.

Изменяют напряжение и наблюдают, что при увеличении или уменьшении его амплитуды соответственно увеличивается или уменьшается амплитуда силы тока. Следовательно, закон Ома справедлив для амплитудных значений силы тока и напряжения:

$$I_m = \frac{U_m}{X_L}.$$

Заменяя максимальные значения силы тока и напряжения через действующие, показывают справедливость закона Ома для их действующих значений:

$$I = \frac{U}{X_L}.$$

Опыт 51*. Демонстрация полного сопротивления

Последовательно с реостатом в сеть переменного тока включают лампочку. Меняя сопротивление цепи, добиваются ее яркого свечения.

Выключив ток, последовательно с реостатом включают батарею конденсаторов. Замыкают цепь и наблюдают уменьшение яркости свечения лампочки, что свидетельствует об увеличении полного сопротивления цепи. Отключив батарею конденсаторов, повторяют опыт с катушкой от универсального трансформатора и вновь замечают увеличение сопротивления. Делают вывод, что полное сопротивление цепи больше ее активного сопротивления.

Последовательно с реостатом, лампочкой и катушкой соединяют батарею конденсаторов (рис. 41). Вопреки ожиданиям сопротивление цепи не увеличилось, а уменьшилось. Замыкают накоротко конденсатор и вновь наблюдают уменьшение яркости свечения лампочки, что свидетельствует об увеличении полного сопротивления. Повторяют опыт, замыкая накоротко катушку, и наблюдают ослабление свечения лампочки.

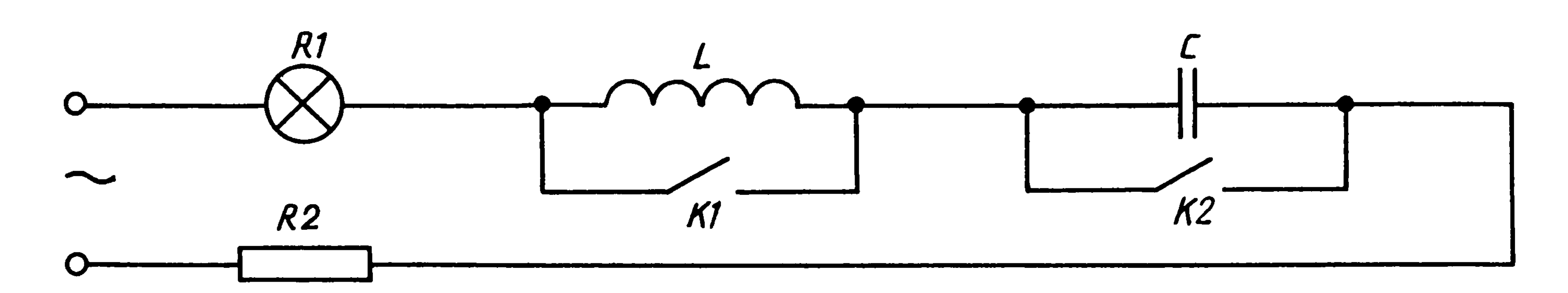


Рис. 41

Проделанные опыты обнаружили, что при последовательном соединении батареи конденсаторов и катушки индуктивности полное сопротивление цепи увеличивается, но меньше, чем при включении какого-либо одного из этих двух приборов. Иными словами, при последовательном их соединении индуктивное и емкостное сопротивления не складываются, а вычитаются.

Таким образом, опыты обнаруживают два существенно важных свойства полного сопротивления: во-первых, оно всегда больше активного сопротивления; во-вторых, совместное действие индуктивного и емкостного сопротивлений приводит не к увеличению, а к уменьшению полного сопротивления.

Опыт 52*. Фазовые соотношения в цепи переменного тока со смешанной нагрузкой

Собирают установку по схеме, изображенной на рисунке 42, *а*. Включив ток, наблюдают на экране осциллографа две синусоидальные кривые, сдвинутые по фазе относительно друг друга (рис. 42, *б*).

Меняя емкость и индуктивность, убеждаются, что сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения зависит от соотношения между емкостным и индуктивным сопротивлениями.

Опыт 53*. Резонанс в последовательной цепи переменного тока

Соединяют последовательно генератор переменного тока регулируемой частоты, катушку «12 В» от универсального трансформатора, батарею конденсаторов, лампочку от карманного фонаря и два ключа (рис. 43). Установив частоту генератора 50—60 Гц, замыкают цепь и, меняя емкость батареи, устанавливают такую силу тока, при которой лампочка будет едва-едва светиться.

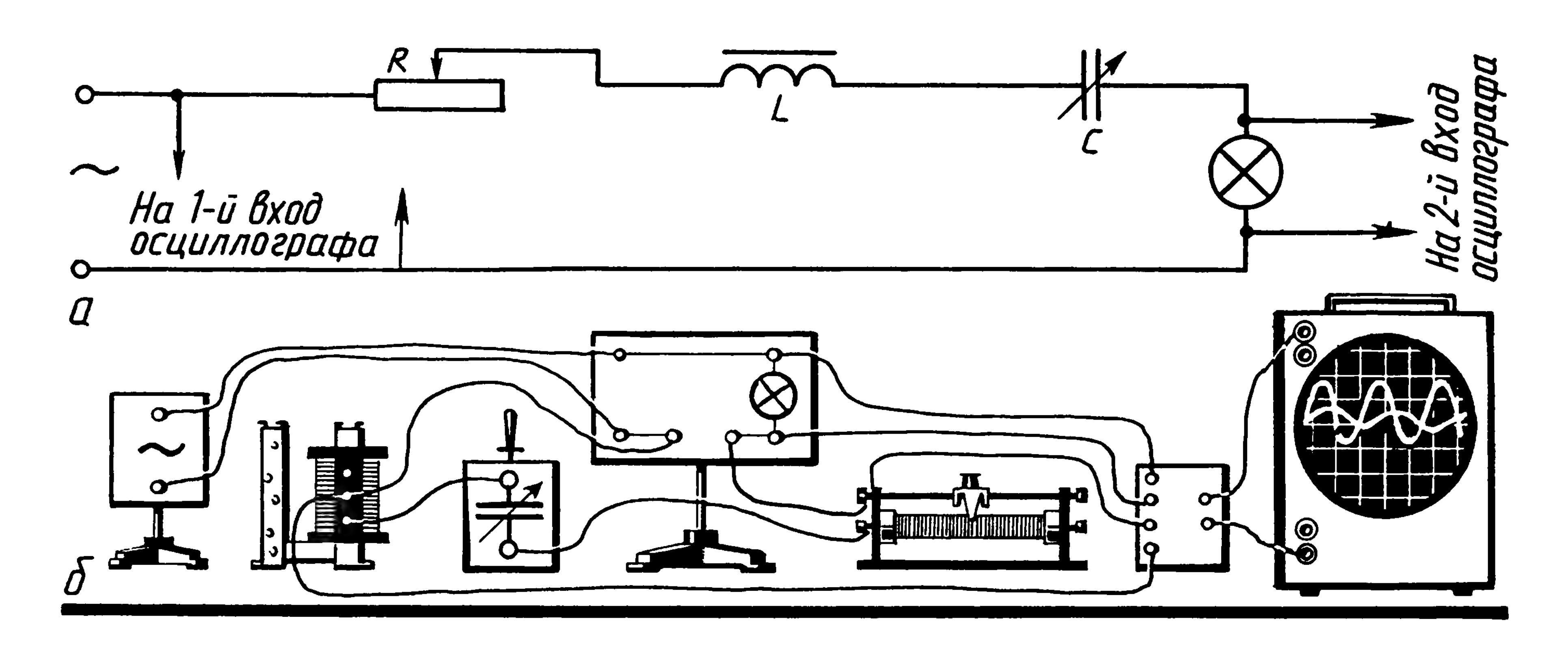


Рис. 42

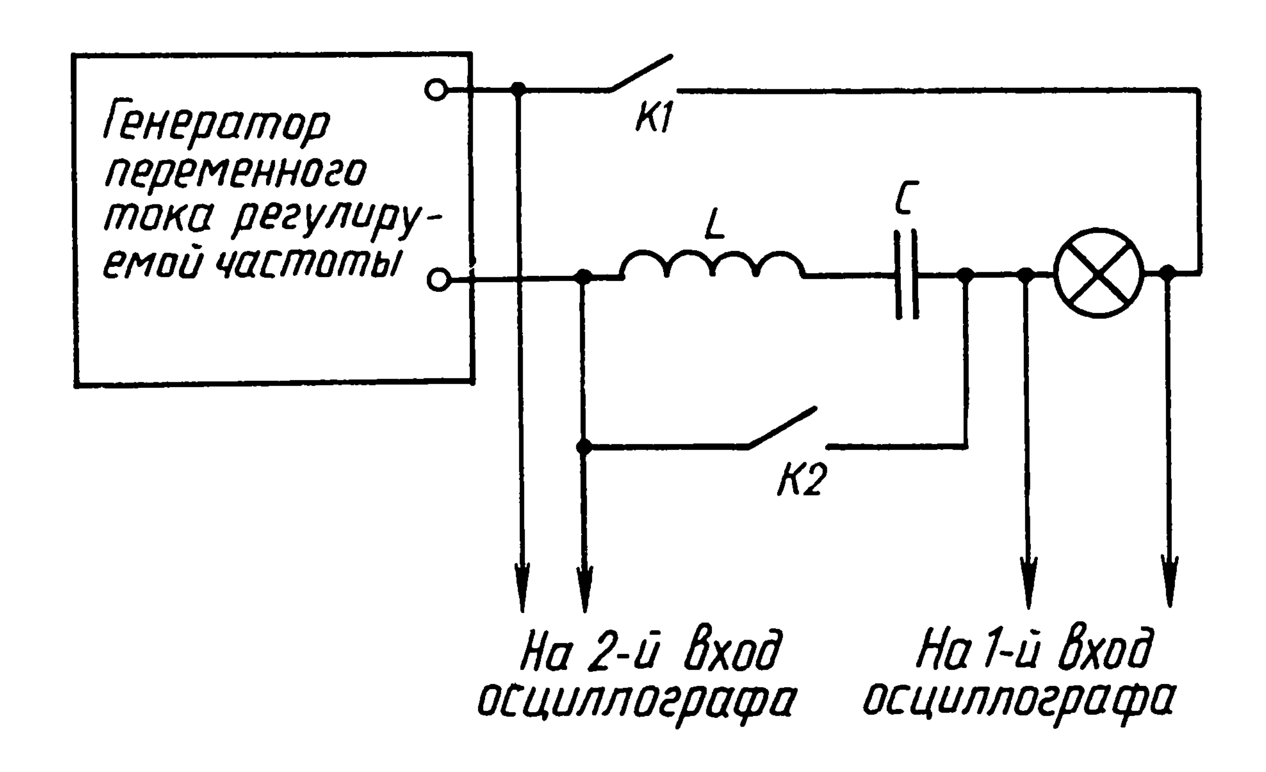


Рис. 43

Изменяя частоту вынужденных колебаний, наблюдают, как постепенно увеличивается яркость свечения лампочки, достигая при некоторой частоте максимума. Перейдя эту частоту, наблюдают постепенное уменьшение яркости свечения.

Объясняя проделанный опыт, обращают внимание учащихся на то, что при изменении частоты емкостное сопротивление уменьшается, а индуктивное увеличивается; разность же между ними уменьшается, становясь равной нулю в момент резонанса. В этот момент контур обладает только активным сопротивлением, что можно показать на опыте. Для этого замыкают ключ *К2* и наблюдают, что никаких изменений в свечении лампочки не происходит. В момент резонанса сила тока достигает максимального значения.

Для демонстрации фазовых соотношений в период, предшествующий резонансу, в момент резонанса и в период, последующий за резонансом, подключают к цепи электронный осциллограф и, меняя частоту вынуждающих колебаний, наблюдают изменение сдвига фаз при переходе через резонанс. Если вначале сдвиг фаз был емкостным, то после перехода через резонансную частоту он становится индуктивным. В момент резонанса фаза колебаний тока совпадает с фазой колебаний напряжения и цепь ведет себя как активное сопротивление (рис. 44).

Опыт 54*. Резонанс в параллельной цепи переменного тока

К генератору регулируемой частоты подключают катушку «12 В» от универсального трансформатора, батарею конденсаторов и две лампочки от карманного фонаря, которые выполняют роль демонстрационных амперметров (рис. 45, *а*).

Установив частоту переменного тока 30—40 Гц, наблюдают яркое свечение лампочки, включенной в ветвь с катушкой. Лампочка, включенная последовательно с конденсатором, не светится. Объясняют, что при малой частоте вынуждающих колебаний ем-

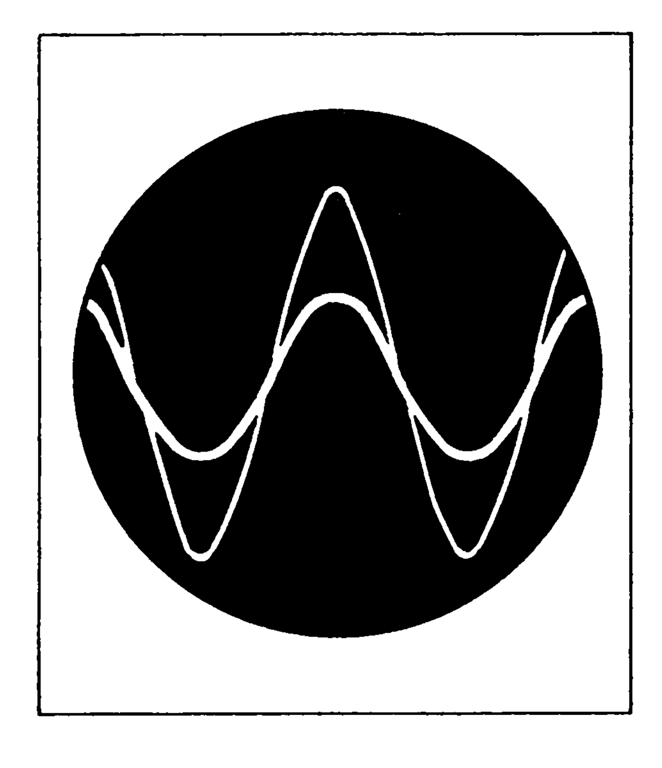


Рис. 44

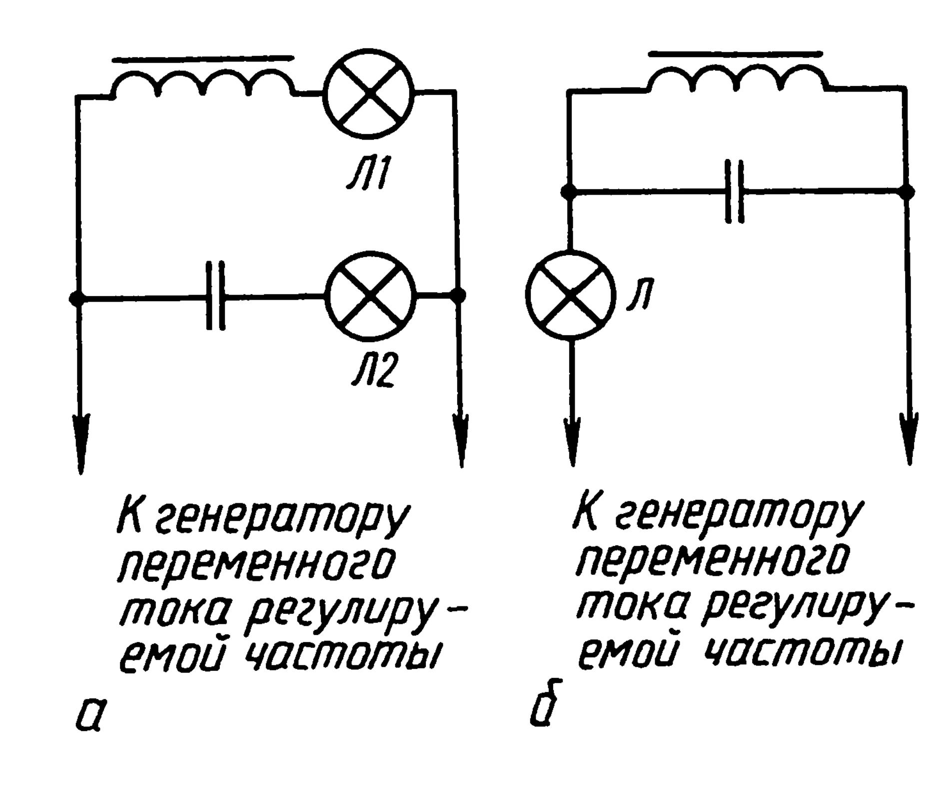


Рис. 45

костное сопротивление ветви с конденсатором велико, а индуктивное сопротивление катушки, наоборот, мало.

Увеличивая частоту переменного тока, наблюдают постепенное уменьшение яркости свечения лампочки, включенной в ветвь с катушкой. Лампочка, включенная последовательно с конденсатором, начинает светиться все ярче и ярче.

Наконец, при некоторой частоте $\omega_р$ (которую надо каким-либо образом заметить) обе лампочки начинают светиться одинаково.

При дальнейшем увеличении частоты яркость свечения лампочек становится неодинаковой: лампочка в емкостной ветви светится все ярче, а лампочка в индуктивной ветви перестает светиться совсем.

Объясняя проделанный опыт, обращают внимание учащихся на то, что при увеличении частоты емкостное сопротивление ветви с конденсатором уменьшается, а индуктивное сопротивление ветви с катушкой увеличивается. В момент резонанса емкостное сопротивление равно индуктивному. Рассказ следует сопроводить графиком (рис. 46).

Для исследования явлений в неразветвленной части несколько видоизменяют схему цепи: отключают лампочки в ветвях и включают одну лампочку в неразветвленную часть цепи (рис. 45, *б*). Повторяя опыт, наблюдают уменьшение силы тока в неразветвленной части цепи при увеличении частоты. При частоте $\omega_р$ лампочка не светится совсем. При дальнейшем увеличении частоты лампочка начинает светиться вновь.

Объясняя вторую часть опыта, обращают внимание учащихся на то, что колебания силы тока в ветви с емкостью опережают колебания напряжения на четверть периода, а в ветви с индуктивностью отстают на четверть периода. Поэтому ток в неразветвленной части определяется разностью сил тока в ветвях. Но в момент резонанса силы тока в ветвях (для идеального контура) одинаковы и их разность равна нулю, а полное сопротивление цепи бесконечно велико. Однако в реальных контурах активное сопротивление не равно нулю, и поэтому в момент резонанса в неразветвленной

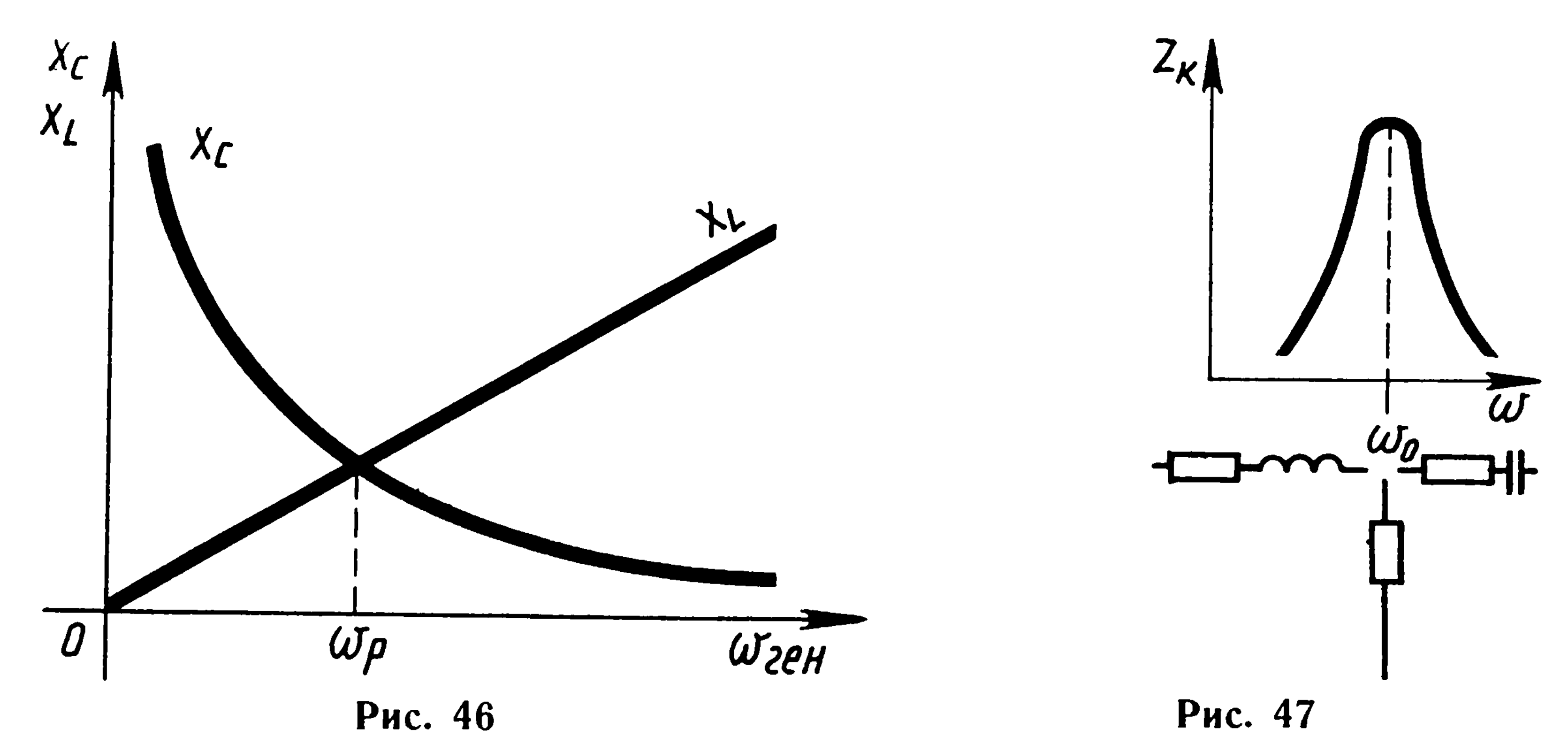


Рис. 46 Рис. 47

части цепи проходит небольшой ток, энергия которого и восполняет потери энергии в контуре.

В заключение следует начертить график изменения полного сопротивления контура при изменении частоты колебаний (рис. 47).

Опыт 55*. Закон Ома для цепи переменного тока со смешанной нагрузкой

Собирают установку, изображенную на рисунке 42. Замыкают ключ и наблюдают на экране осциллографа осциллограммы силы тока и напряжения.

Воспроизводя осциллограммы на доске, обращают внимание учащихся на то, что закон Ома оказывается несправедливым для мгновенных значений силы тока и напряжения.

Изменяя напряжение, наблюдают, что при увеличении или уменьшении амплитуды напряжения соответственно увеличивается или уменьшается амплитуда силы тока, что свидетельствует о справедливости закона Ома для амплитудных значений силы тока и напряжения:

$$I_m = \frac{U_m}{Z}.$$

Заменяя максимальные значения силы тока и напряжения через действующие значения, показывают, что закон Ома справедлив для действующих значений силы тока и напряжения:

$$I = \frac{U}{Z}.$$

Опыты 56—58*. Демонстрация активной и полной мощности переменного тока

Цель опыта: 1) показать, что мощность переменного тока нельзя определять по ранее установленной для постоянного тока формуле

$P = IU$; 2) создать предпосылки для вывода формулы $P = IU \cos \varphi$.

Опыт распадается на следующие взаимосвязанные между собой демонстрации, часть из которых носит повторительный характер:

1. Собирают цепь, состоящую из электрического утюга, амперметра, вольтметра и ваттметра (см. рис. 33). Замкнув цепь, измеряют силу тока, напряжение, мощность и убеждаются, что энергия генератора в такой цепи полностью превращается в другие виды энергии.

2. Собирают цепь из амперметра, вольтметра, ваттметра и батареи конденсаторов (рис. 48). Увеличивая емкость батареи, устанавливают в цепи силу тока 2—3 А и убеждаются при этом, что стрелка ваттметра находится почти на нулевом делении. Убеждаются в исправности ваттметра. Для этого, отключив конденсатор, включают вместо него лампу накаливания и обнаруживают отклонение стрелки ваттметра.

Объясняют наблюдаемое явление тем, что в цепи переменного тока с емкостью в течение первой четверти периода происходит заряд конденсатора и энергия генератора превращается в энергию электрического поля конденсатора. В течение второй четверти периода конденсатор разряжается и его энергия возвращается в цепь. Средняя же мощность за период будет равна нулю, что и показывает ваттметр. В процессе объяснения используют знания учащихся о фазовых соотношениях в цепи с емкостью для построения кривой мгновенной мощности (рис. 49).

Указывают, что мощность, измеряемая ваттметром, называется активной, а мощность, найденная по показаниям амперметра и вольтметра,— полной (обозначают ее буквой S).

3. Заменив конденсатор катушкой «120 В» от универсального трансформатора, повторяют опыт и замечают, что стрелка ваттметра также находится почти на нуле.

В цепи с катушкой индуктивности, как и в цепи с батареей конденсаторов, происходят обратимые превращения энергии генератора

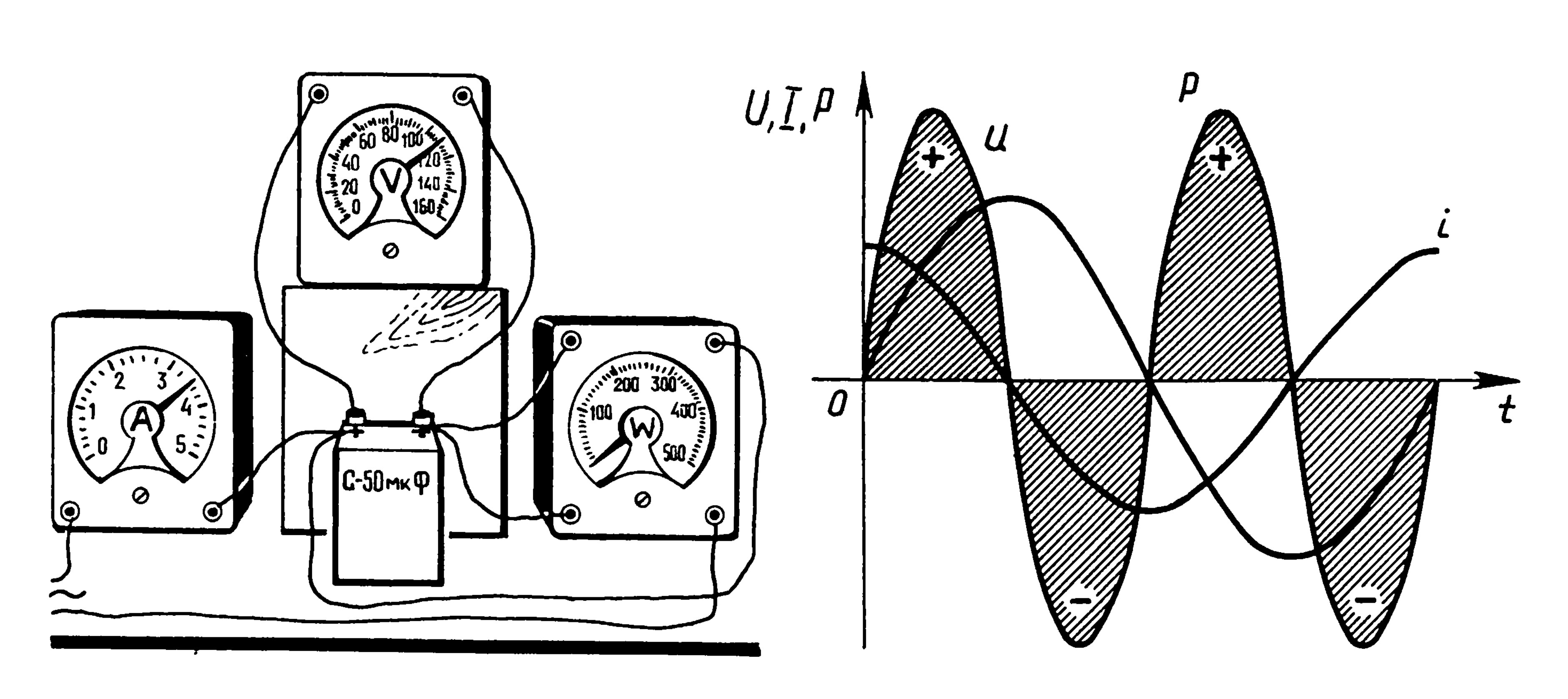


Рис. 48 Рис. 49

в энергию магнитного поля катушки, а часть энергии на активном сопротивлении катушки преобразуется в тепло. Рассказ также сопровождают графиком, построенным на основании анализа наблюдавшихся ранее осциллограмм силы тока и напряжения.

Опыт 59. Измерение коэффициента мощности

Собирают цепь со смешанной нагрузкой и наблюдают, что активная мощность и в этом случае меньше полной. Так как $S=IU$, то можно записать, что

$$P=kIU,$$

где k — некоторый коэффициент, зависящий от характера цепи.

В цепи с активным сопротивлением $k=1$, $P=IU$; емкостным $k=0$, $P=0$; индуктивным $k=0$, $P=O$; со смешанным $1>k>0$, $P>0$.

Следовательно, $1\geqslant k\geqslant 0$.

Но в таких же пределах изменяется косинус угла сдвига фаз между силой тока и напряжением: в цепи с активным сопротивлением $\varphi=0$, $\cos\varphi=1$; емкостным $\varphi=90°$, $\cos\varphi=0$; индуктивным $\varphi=90°$, $\cos\varphi=0$; со смешанным $0<\varphi<90°$, $0<\cos\varphi<1$.

Это дает некоторое основание записать

$$P=IU\cos\varphi,$$

откуда коэффициент мощности может быть определен как величина, измеряемая отношением активной мощности к полной:

$$\cos\varphi=\frac{P}{IU}.$$

Опыт 60. Устройство и принцип работы однофазного трансформатора

Целью опыта является исследование процессов, происходящих в трансформаторе. Опыт включает в себя несколько демонстраций.

Включив трансформатор, измеряют напряжение на первичной и вторичной обмотках и определяют коэффициент трансформации:

$$K=\frac{U_1}{U_2}.$$

Присоединяют ко вторичной обмотке ламповый реостат (рабочее напряжение его ламп должно быть выше напряжения, даваемого трансформатором). Увеличивая число включенных ламп, замечают, что увеличение нагрузки вызывает возрастание силы тока не только во вторичной цепи, но и в первичной.

Присоединив к первичной цепи электронный осциллограф с коммутатором (рис. 50), повторяют опыт. Наблюдая за кривыми на экране осциллографа, обнаруживают, что при холостом ходе коле-

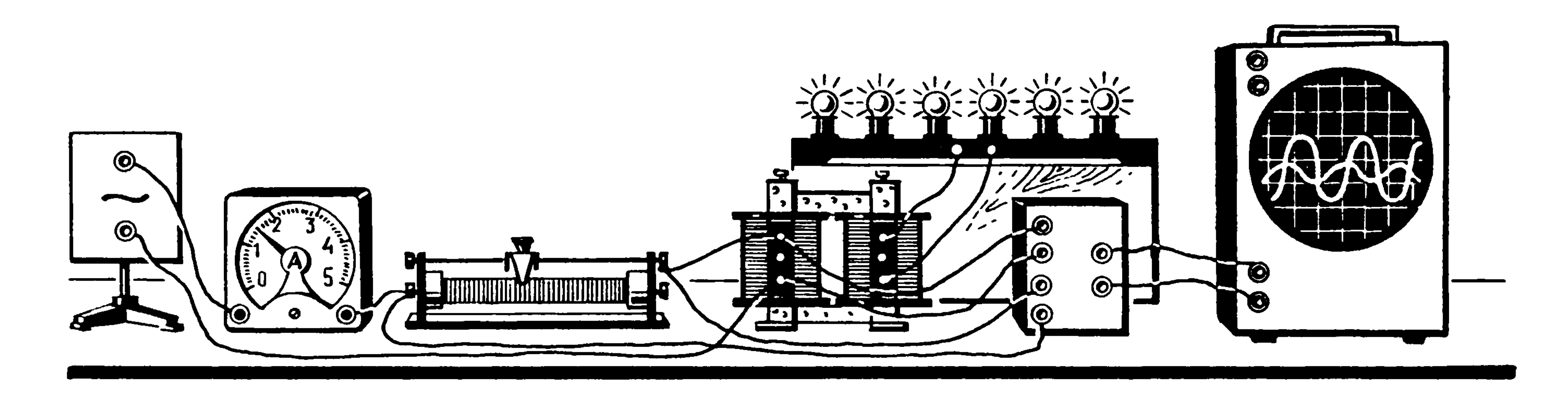


Рис. 50

бания силы тока отстают от колебаний напряжения почти на 90°. По мере нагрузки трансформатора сдвиг по фазе уменьшается, и при некоторой нагрузке (для универсального трансформатора примерно 200 Вт) колебания силы тока и колебания напряжения практически совпадают по фазе.

Подключают один вход осциллографа параллельно первичной, а другой — параллельно вторичной обмотке трансформатора и наблюдают, что ЭДС индуцируемого во вторичной обмотке электрического поля сдвинута по фазе относительно напряжения сети на 180°. Напоминают в этой связи о правиле Ленца.

Опыты 61—64. Выпрямление переменного тока

Цель демонстрации — иллюстрировать рассказ учителя о выпрямлении переменного тока. Демонстрация состоит из нескольких взаимосвязанных опытов.

Учащимся сообщают, что для некоторых областей техники необходим постоянный ток, который обычно получают путем выпрямления переменного тока. Все выпрямительные устройства, как правило, содержат следующие основные элементы: 1) силовой трансформатор, дающий переменный ток нужного напряжения; 2) выпрямительный элемент — вентиль, пропускающий ток только в одном направлении, и 3) фильтр, об устройстве и назначении которого будет сказано позже.

Поскольку устройство и механизм односторонней проводимости полупроводниковых диодов были объяснены раньше, на данном уроке изучаются только схемы электрических цепей, применяемых для выпрямления переменного тока, и происходящие в них процессы.

1. Собирают цепь, изображенную на рисунке 51. Объяснив назначение основных элементов, включают цепь в сеть через понижающий трансформатор, дающий напряжение до 12 В. С помощью осциллографа обнаруживают, что: а) в цепи существует переменный ток; б) выпрямительный элемент — диод пропускает ток только одного направления. Обращают внимание учащихся на то, что через нагрузочное сопротивление $R_н$ проходит пульсирующий ток.

2. Чтобы сгладить пульсации, ставят сглаживающий фильтр, состоящий из конденсатора большой емкости и катушки индуктив-

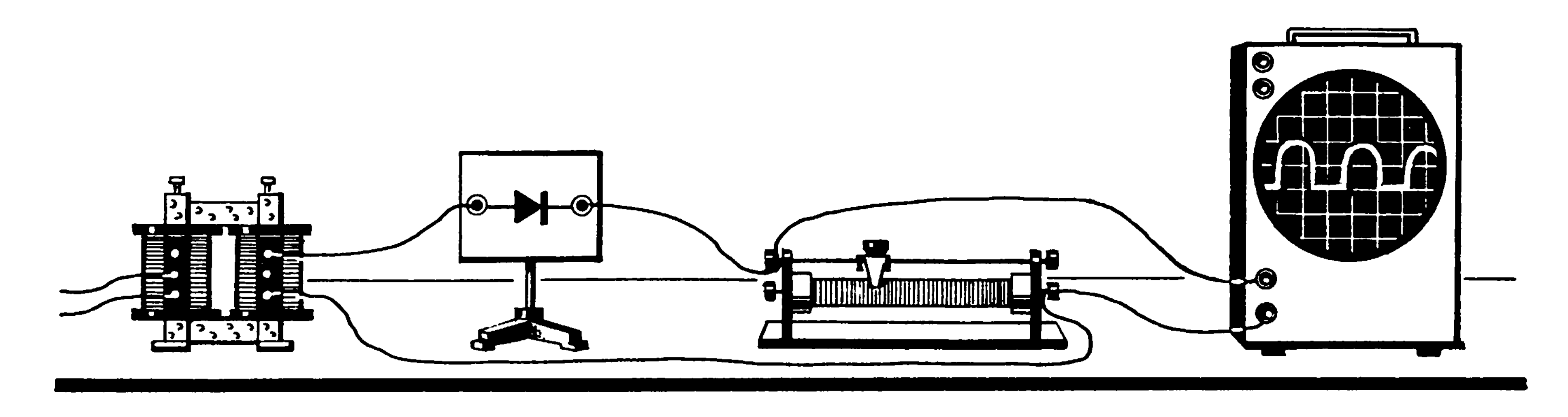


Рис. 51

ности (рис. 52). Включив собранную цепь в сеть переменного тока, с помощью осциллографа обнаруживают, что через нагрузочное сопротивление идет практически постоянный ток, а напряжение на диоде изменяется по синусоидальному закону.

Объясняют, что дроссель представляет для переменной составляющей большое сопротивление и она в основном замыкается через конденсатор, обладающий для переменной составляющей небольшим сопротивлением.

3. Собирают цепь по схеме рисунка 53 и объясняют принцип работы двухполупериодного выпрямителя.

Обращают внимание учащихся на то, что и в этом случае через нагрузочный резистор проходит пульсирующий ток, но частота пульсаций в 2 раза выше.

4. Собрав цепь по схеме, изображенной на рисунке 54, с помощью осциллографа показывают работу сглаживающего фильтра. В ходе этой демонстрации сначала показывают осциллограмму силы

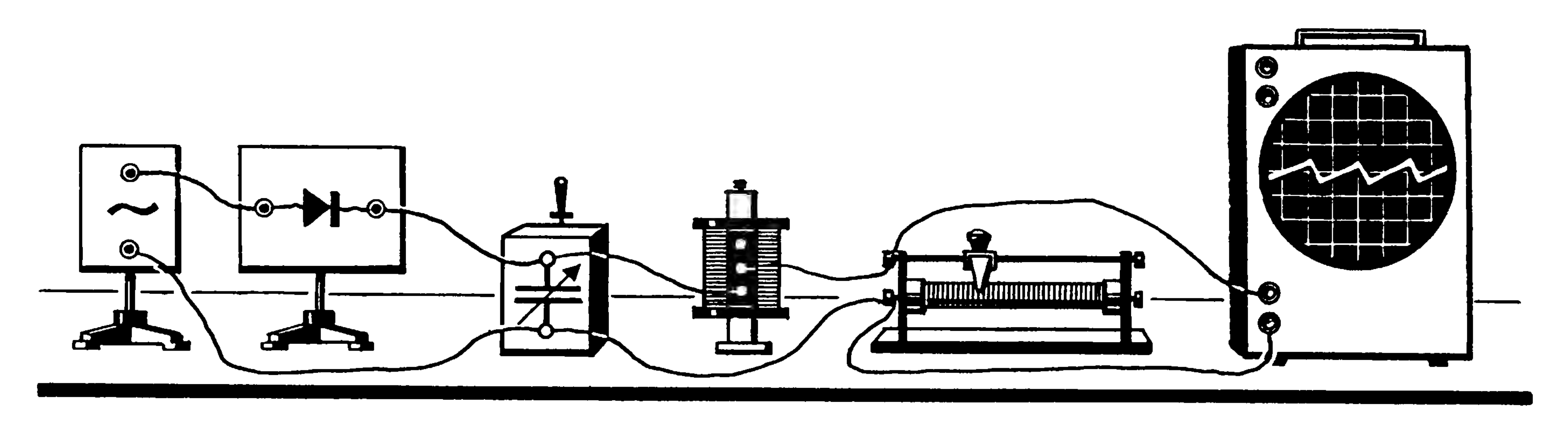


Рис. 52

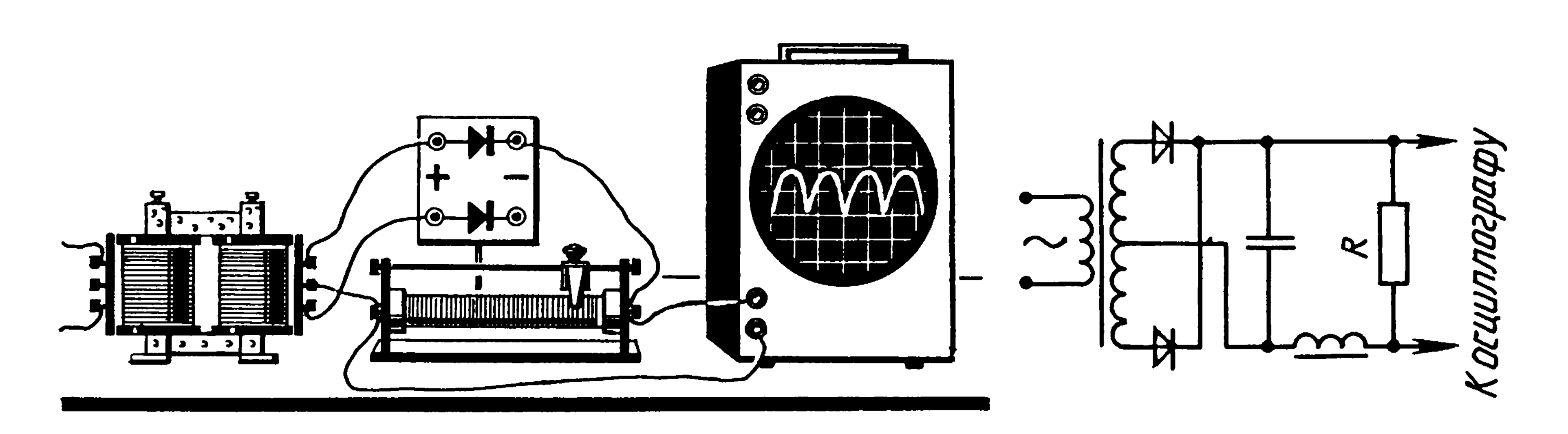


Рис. 53

Рис. 54

тока в обмотке трансформатора, затем — в нагрузке без конденсатора и, наконец, в нагрузке с конденсатором. В качестве катушки индуктивности можно использовать любую катушку с магнитопроводом, а в качестве конденсатора — демонстрационную батарею конденсаторов.

§ 6. Автоколебания

Изучение автоколебаний целесообразно начать с введения понятия об автоколебательной системе. Под автоколебательной системой понимают такую систему, в которой при отсутствии внешнего периодического воздействия возникают и существуют сколь угодно долго периодические колебания.

В средней школе в основном рассматриваются автоколебательные системы, в которых существуют гармонические колебания. Однако целесообразно познакомить учащихся и с автоколебательными системами, в которых существуют и релаксационные колебания.

На первом уроке, посвященном изучению автоколебательных систем, напоминают учащимся, что свободные колебания всегда затухают. Это происходит из-за наличия в колебательных системах трения (сопротивления). Благодаря трению (сопротивлению) часть сообщенной колебательной системе энергии необратимо превращается во внутреннюю энергию и рассеивается.

Для получения незатухающих колебаний необходимо каким-либо способом непрерывно пополнять энергию в колебательной системе.

Очевидно, что для пополнения энергии в колебательную систему необходимо включить источник энергии.

Специальное устройство, которое регулирует поступление энергии в колебательную систему, называют обычно клапаном.

На рисунке 55 приведена блочная схема автоколебательной системы. Связь, обеспечивающая передачу энергии от источника в колебательную систему, получила название прямой связи, а связь, благодаря которой колебательная система управляет работой клапана, называется обратной связью.

Опыт 65. Маятниковые часы как пример автоколебательной системы

Показывают, что маятник, будучи приведен в колебательное движение, через некоторое время останавливается из-за наличия трения.

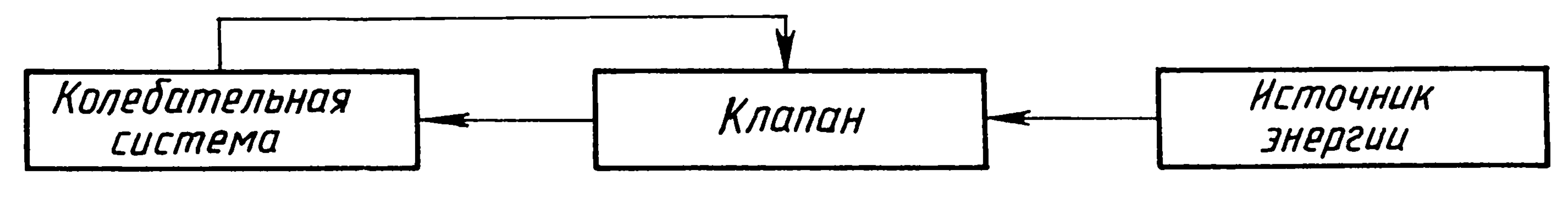
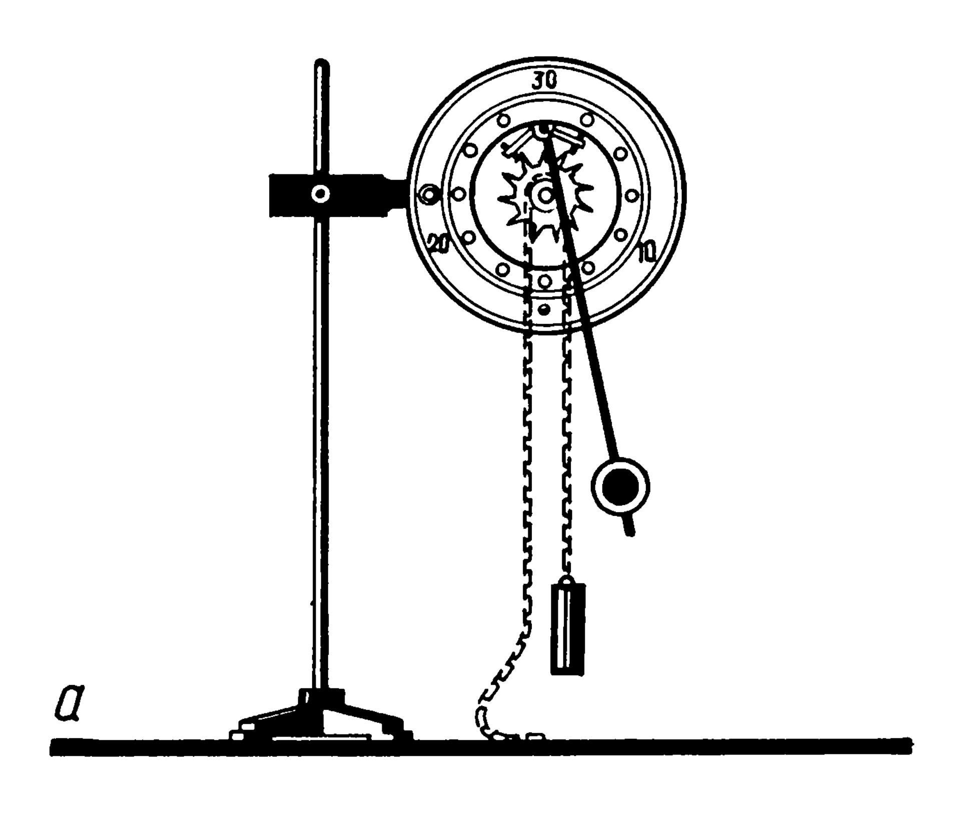


Рис. 55



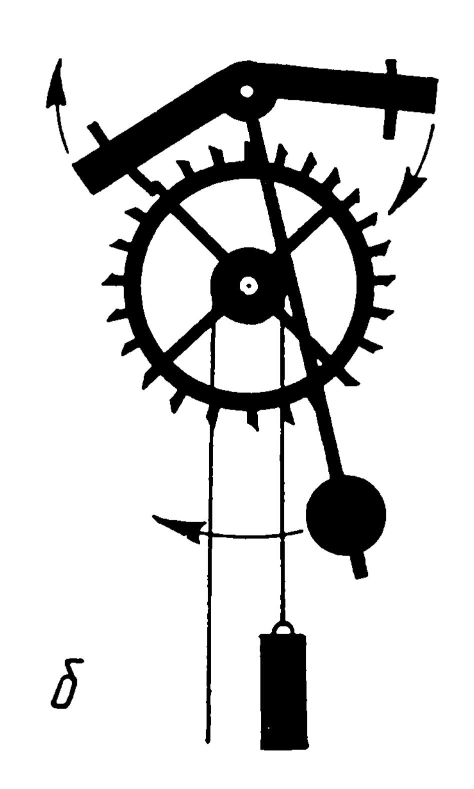


Рис. 56

Затем сообщают учащимся, что в 1657 г. голландский физик Христиан Гюйгенс предложил использовать изохронность колебаний маятника для создания равномерного движения стрелки на часах. Устройство, предложенное Гюйгенсом, в его главных чертах сохранилось до настоящего времени. Показывают основные части этого устройства: маятник, поднятый груз (источник энергии), анкер и ходовое колесо (рис. 56).

С помощью осветителя для теневой проекции проецируют маятник на экран и, подтолкнув маятник, объясняют действие механизма. Обращают внимание на то, что маятник в основном движется свободно, получая за период два толчка: один — от левой палетты (влево) и второй — от правой палетты (вправо).

Для фиксации рассматриваемых положений маятника надо использовать подставку.

Убрав фиксатор, подталкивают маятник и наблюдают его колебания и взаимодействие ходового колеса с анкером. Обращают внимание учащихся на то, что колебания маятника происходят в отсутствие внешнего периодического воздействия извне. Колебания возникают и поддерживаются самой колебательной системой. Источником энергии этой автоколебательной системы служит поднятый груз (или закрученная пружина).

В конце урока для закрепления материала целесообразно показать кинокольцовку «Применение маятника в часах».

Опыты 66—68. Автогенератор электромагнитных колебаний

1. Одной из наиболее распространенных автоколебательных систем является автогенератор электромагнитных колебаний. Его основные элементы (рис. 57, *а*): колебательный контур (колебательная система), батарея гальванических элементов (источник энергии), транзистор (клапан), катушка обратной связи. На рисунке 57, *б*, показана схема автогенератора, по которой следует

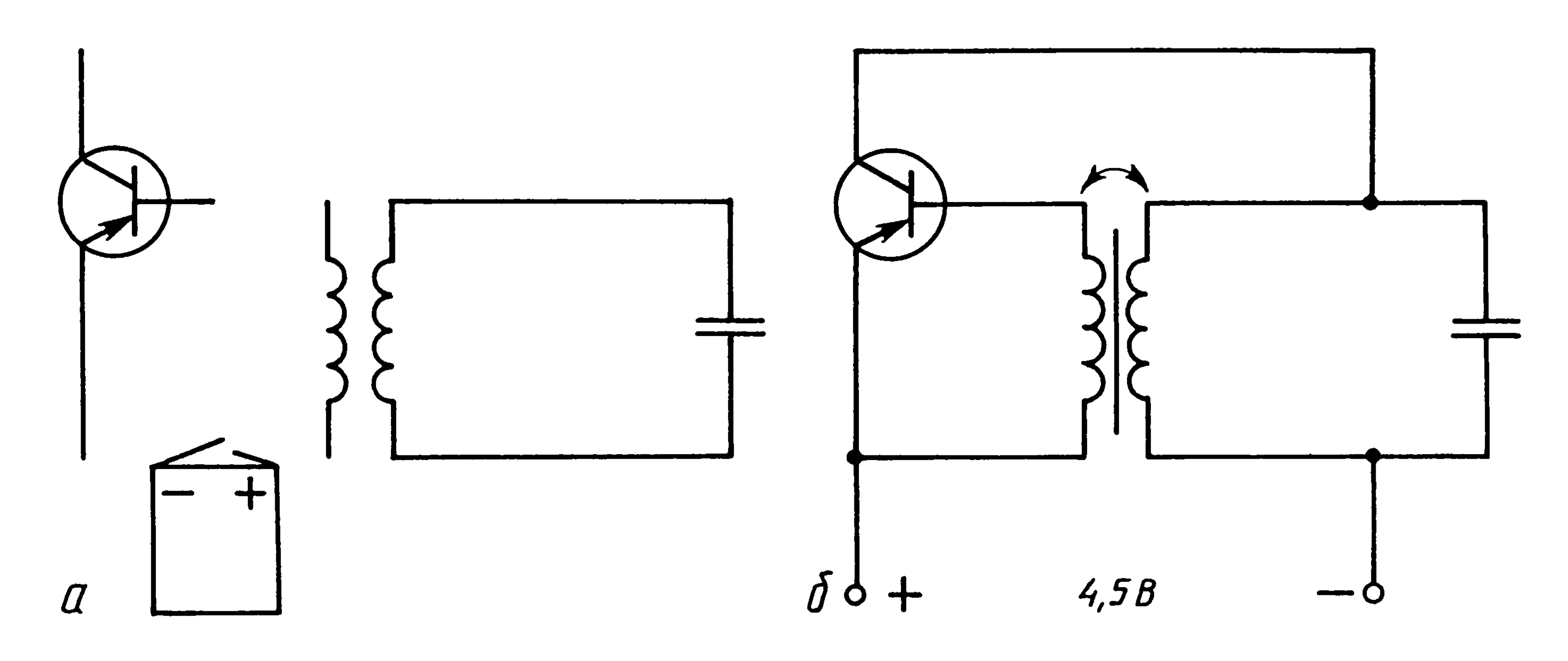


Рис. 57

вести объяснение принципа устройства и работы автогенератора, а на рисунке 58, *а* — схема, по которой собирается демонстрационная установка. Резисторы *R1* и *R2*, имеющие вспомогательное значение, следует расположить на обратной стороне панели транзистора из комплекта полупроводниковых приборов, выпускаемых для школ.

Это связано с тем, что их назначение и роль при изучении автогенератора в средней школе не объясняется. С этой же целью на обратной стороне панели установлена вспомогательная клемма *D* (см. рис. 58, *а*). Сопротивление переменного резистора *R1* — от 10 до 20 кОм, сопротивление резистора *R2* — от 5 до 10 кОм.

Для получения электромагнитных колебаний очень низкой частоты в качестве катушки индуктивности следует использовать дроссельную катушку универсального трансформатора (3 600 витков), а в качестве катушки обратной связи — катушку от универсального трансформатора «120/220 В». В качестве конденсатора можно

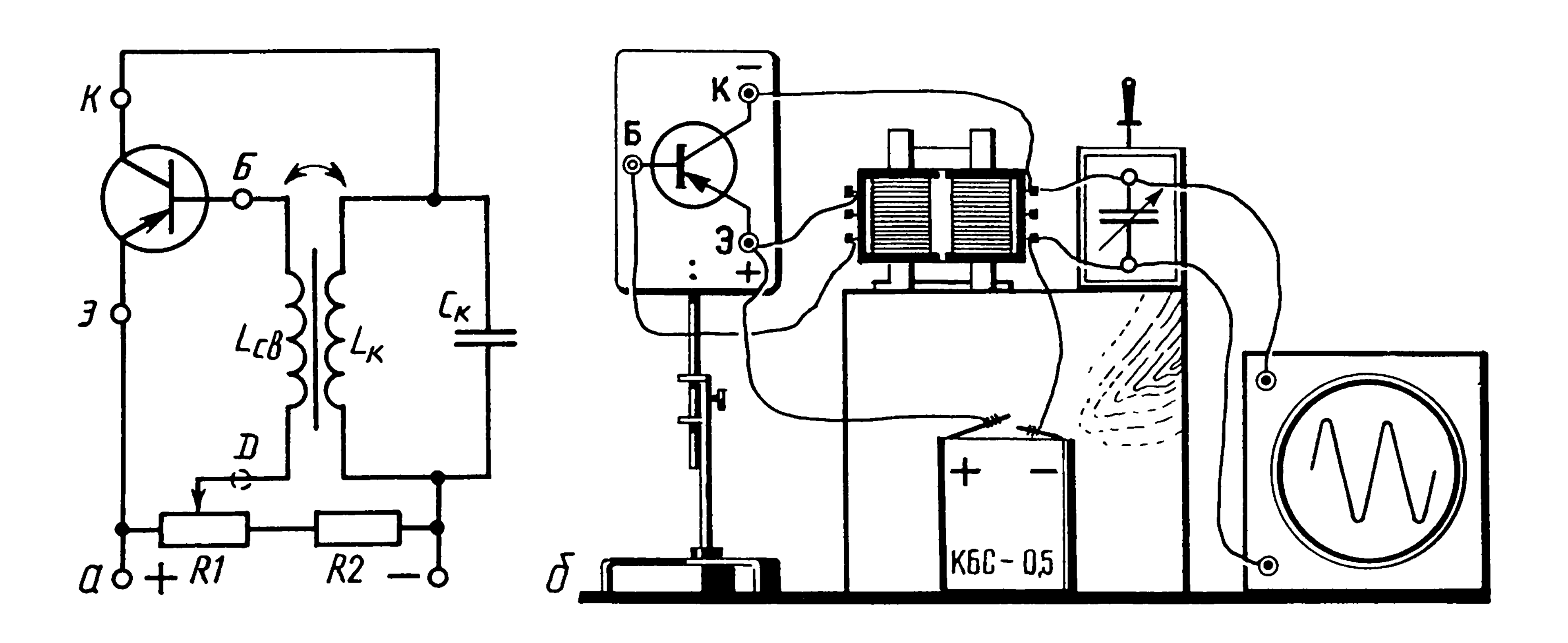


Рис. 58

использовать электролитический конденсатор с рабочим напряжением не менее 100 В и электроемкостью от 100 до 2 000 мкФ. В качестве индикатора колебаний в этом случае следует использовать демонстрационный вольтметр с дополнительным сопротивлением на 5 В и шкалой с нулем посредине. Вольтметр подключается к вспомогательной обмотке (25 витков).

Замкнув ключ, наблюдают колебания стрелки вольтметра. Если колебаний нет, надо изменить включенную часть переменного резистора *R1*. Если и после этого колебаний нет, надо поменять местами проводники, подходящие к катушке обратной связи, или, что лучше запоминается учащимися, сняв катушку с магнитопровода, надо повернуть ее на 180° и поставить на место. Если цепь собрана правильно, то после изменения включенной части резистора *R1* колебания обязательно возникнут.

Для получения колебаний звуковой частоты в качестве контурной катушки следует использовать катушку от универсального трансформатора «120/220 В» (220-вольтовую обмотку), а катушку трансформатора на 12 В использовать для обратной связи. Роль контурного конденсатора выполняет демонстрационная батарея конденсаторов. Если цепь собрана правильно, генератор начинает работать сразу. Если генератор не работает, надо поменять местами проводники, подходящие к катушке обратной связи (или повернуть катушку на 180°). Индикатором колебаний может быть громкоговоритель.

Использовать осциллограф в качестве индикатора следует не всегда: из-за того, что иногда рабочая точка транзистора находится не на прямолинейном участке, а также из-за гистерезиса железа магнитопровода колебания в контуре имеют не строго синусоидальную форму.

Собрав установку, изображенную на рисунке 58, *б*, демонстрируют, что в автогенераторе без внешнего воздействия возникли электромагнитные колебания синусоидальной формы. Таким образом, в автогенераторе происходит преобразование энергии источника постоянного тока в энергию электромагнитных колебаний.

Затем следует, еще раз напомнив схему генератора, объяснить его работу.

В момент подключения источника постоянного тока через коллекторную цепь транзистора проходит ток $I_к$, заряжающий конденсатор колебательного контура $C_к$. Так как к конденсатору подключена контурная катушка $L_к$, то в контуре возникнут свободные электромагнитные колебания. Так как катушка колебательного контура индуктивно связана с катушкой обратной связи $L_{св}$, то ее изменяющееся магнитное поле вызовет в катушке обратной связи переменную ЭДС такой же частоты, как и колебания в контуре. Эта ЭДС, будучи приложена к участку база — эмиттер, вызовет пульсацию тока в цепи коллектора. Так как частота этих пульсаций равна частоте электромагнитных колебаний в контуре, то они подзаряжают конденсатор контура и тем самым поддерживают постоянной амплитуду колебаний в контуре.

Сказанное выше справедливо не всегда, а только тогда, когда импульсы тока в коллекторной цепи будут возникать в такт с колебаниями электромагнитных колебаний в контуре. Это условие назвали фазовым условием работы автогенератора.

Поскольку в контуре существуют свободные колебания, то для них контур представляет только активное сопротивление, а потому напряжение на участке база — эмиттер и напряжение на участке эмиттер — коллектор должны быть сдвинуты на 180°. Чтобы убедить в этом учащихся, необходимо поменять местами провода, подходящие к катушке обратной связи. В этом случае колебания в генераторе не возникнут.

Второе условие работы генератора заключается в следующем: энергия, поступающая в контур из коллекторной цепи, должна полностью восполнить необратимые преобразования в нем энергии. Это условие называют условием амплитуд или амплитудным условием самовозбуждения. Оно обеспечивается обратной связью. Чтобы убедить в этом учащихся, надо приподнять и медленно удалить катушку обратной связи от контурной катушки. На экране осциллографа видно, как постепенно уменьшается амплитуда колебаний в контуре и наконец колебания исчезают.

На основании проделанных опытов делают вывод, что обратная связь в генераторе автоколебаний должна удовлетворять двум условиям: а) энергия от источника должна поступать в такт с колебаниями в контуре; б) поступающая от источника энергия должна быть равна ее потерям в контуре.

2. Если в школе нет необходимого транзистора, опыты, описанные выше, можно поставить с генератором, схема которого приведена на рисунке 59. Ниже приведены данные о деталях, используемых в автогенераторе, собранном по этой схеме.

Контурная катушка — катушка «220 В» от универсального трансформатора. Катушка обратной связи — катушка «12 В» от универсального трансформатора. Транзистор — МП41 или КТ207. Резисторы: $R1$ — 1,5 кОм; $R2$ — 75 кОм. Конденсаторы: $C1$ — 1 мкФ; $C_к$ — 4 мкФ. Источник тока $\mathcal{E}$ = 4,5—6 В.

Контурная катушка и катушка обратной связи надеты на магнитопровод от универсального трансформатора.

Конденсатор $C1$ необходим для того, чтобы база и эмиттер не соединялись непосредственно через катушку обратной связи.

3. На факультативных занятиях и на занятиях физического кружка крайне интересно и полезно собрать автогенератор с емкостной обратной связью, схема которого изображена на рисунке 60. Все необходимые данные приведены на схеме.

Опыты 69—70. Примеры автоколебательных систем

Автоколебательные системы весьма распространены, и потому несколько таких систем следует показать учащимся.

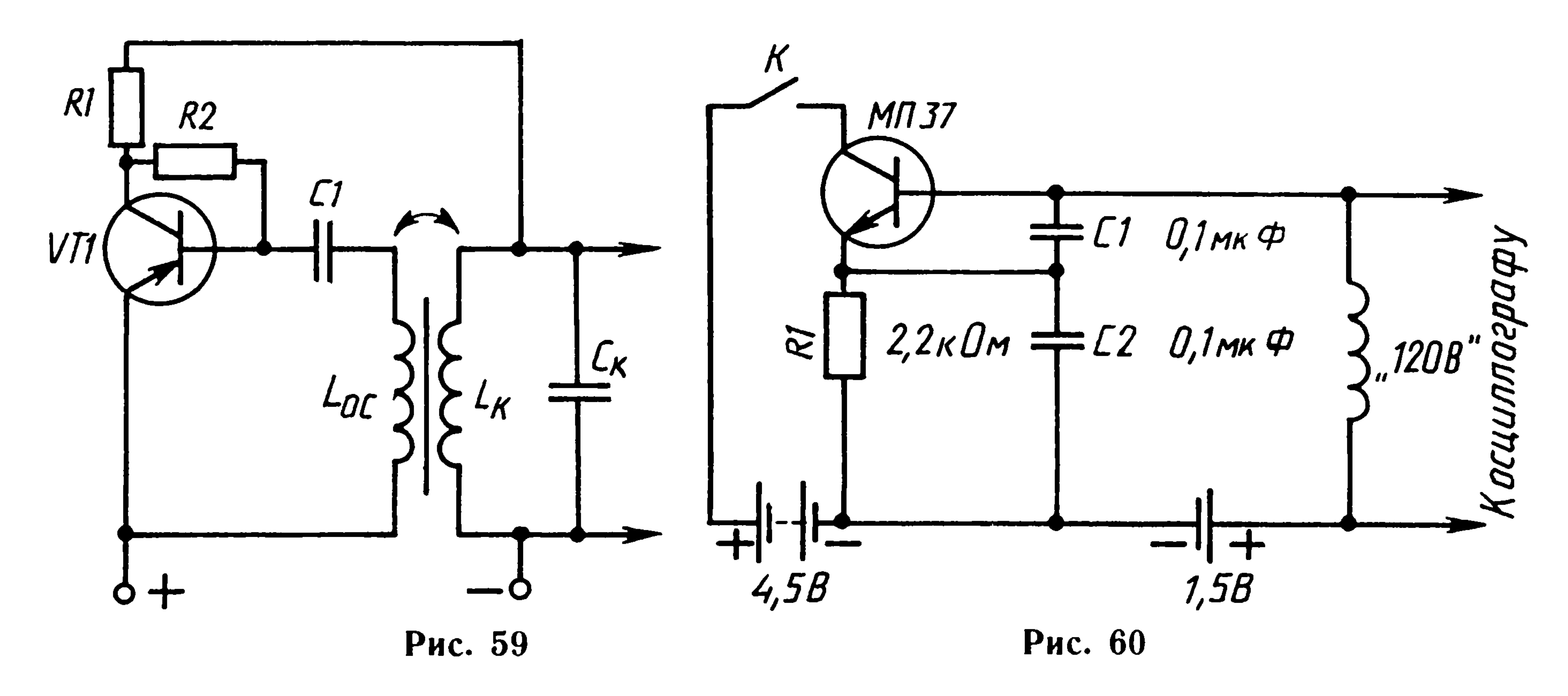


Рис. 59 Рис. 60

1. Органную трубу присоединяют шлангом к выходному отверстию пылесоса. После включения пылесоса труба издает звук постоянной частоты и тональности.

При продувании воздуха в щели *Щ* происходит периодическое образование вихрей то с одной, то с другой стороны клина (рис. 61). На столб воздуха действуют периодические толчки, в результате чего в нем возникают колебания. Эти колебания в свою очередь действуют на процесс вихреобразования (обратная связь), и столб воздуха колеблется с постоянной амплитудой.

2. Сообщают, что автоколебательными системами являются и смычковые инструменты (скрипка, виолончель, кяманча и др.). В этих инструментах колебательной системой является струна, источником энергии — рука музыканта, обратная связь осуществляется через смычок и струну.

При движении смычка по струне последняя сначала увлекается смычком, а затем срывается и возвращается в начальное положение, по инерции проходит дальше. Затем процесс повторяется.

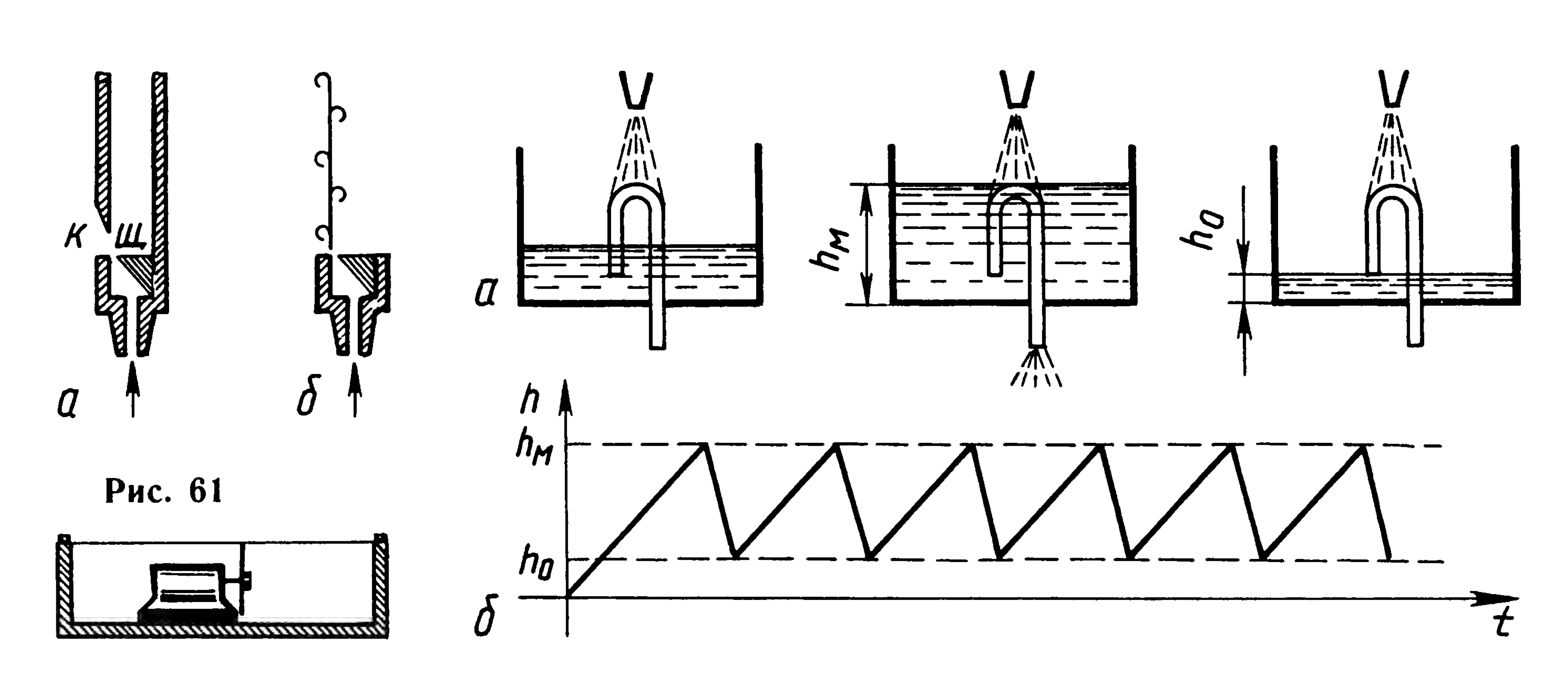


Рис. 61

Рис. 62

Рис. 63

Для демонстрации автоколебаний струны к последней пододвигают «бесконечный смычок» — гладкий диск из винипласта, насаженный на ось универсального двигателя (рис. 62). Диск должен быть натерт канифолью. При вращении двигателя слышен звук постоянной громкости.

Опыты 71—72. Частота автоколебаний

1. Присоединяют органную трубу к выходному отверстию пылесоса — слышен звук определенной частоты. Вдвигают в трубу поршень и замечают изменение частоты звуковых колебаний. Делают вывод о зависимости частоты колебаний от длины воздушного столба.

2. К натянутой струне пододвигают «бесконечный смычок» — слышен звук определенной высоты. Прижимают струну к подставке пальцем и замечают изменение высоты тона.

Изменение высоты звука наблюдают и при изменении натяжения струны.

3. Собирают автогенератор, в котором емкость, индуктивность и активное сопротивление контура можно изменять (см. рис. 58). Включив питание, наблюдают на экране осциллографа осциллограмму колебаний.

Изменяя емкость конденсатора контура, замечают изменение частоты колебаний: при уменьшении емкости частота увеличивается, а при увеличении емкости частота уменьшается. Изменяя индуктивность катушки контура (в катушку сначала вдвигают, а затем выносят из нее стальное ярмо от магнитопровода), замечают, что с увеличением индуктивности частота уменьшается, а с уменьшением индуктивности частота увеличивается. Меняя активное сопротивление контура с помощью реостата, замечают, что частота автоколебаний изменяется незначительно.

Наконец, при изменении напряжения в цепи эмиттер — коллектор также происходит небольшое изменение частоты колебаний.

Опыты дают основание утверждать, что частота автоколебаний зависит от параметров автоколебательной системы и режима ее работы.

Опыты 73—74. Амплитуда автоколебаний

1. В демонстрационной модели часового механизма отводят маятник из положения равновесия сначала на небольшой, а затем на очень большой угол и замечают, что амплитуда установившихся автоколебаний не зависит от начального толчка.

2. Собирают автогенератор (см. рис. 58), изменяя напряжение в цепи эммиттер — коллектор, и замечают, что амплитуда установившихся автоколебаний тем больше, чем больше напряжение.

Отодвигая катушку обратной связи от контурной катушки, замечают, что амплитуда установившихся автоколебаний уменьшается.

Увеличивая и уменьшая активное сопротивление контура, наблюдают соответственно уменьшение и увеличение амплитуды колебаний.

Описанные опыты позволяют сделать вывод, что амплитуда установившихся автоколебаний не зависит от начальных условий и определяется лишь параметрами автоколебательной системы.

Опыты 75—77*. Релаксационные автоколебания

1. На столе устанавливают сосуд Тантала — бутыль с подкрашенной водой и банку для приема отработанной воды. Открыв кран и отрегулировав струю воды, наблюдают колебания уровня воды в сосуде (рис. 63, *а*). Анализируя наблюдаемое явление, вычерчивают на доске график колебаний уровня воды в сосуде (рис. 63, *б*). В процессе построения графика объясняют, что жидкость вливается в сосуд с постоянной скоростью. Пока отливная трубка не заполнена, уровень жидкости повышается по линейному закону. Когда же уровень жидкости достигнет максимальной высоты h_m, сифон начинает действовать и уровень жидкости быстро падает до значения h_0. После этого начинается новое заполнение сосуда водой и т. д. График колебаний высоты уровня воды в сосуде имеет характерную пилообразную форму.

Время заполнения всегда больше времени опорожнения сосуда. Расход воды происходит скачками.

Полезно начертить график скорости наполнения сосуда.

2. Собирают установку, изображенную на рисунке 64. Открыв кран, наблюдают за колебаниями сосуда. Предлагают учащимся начертить график изменения уровня жидкости.

3. Собирают установку, изображенную на рисунке 65. Сопротивление потенциометра *R1* порядка 1 000 кОм, переменного резис-

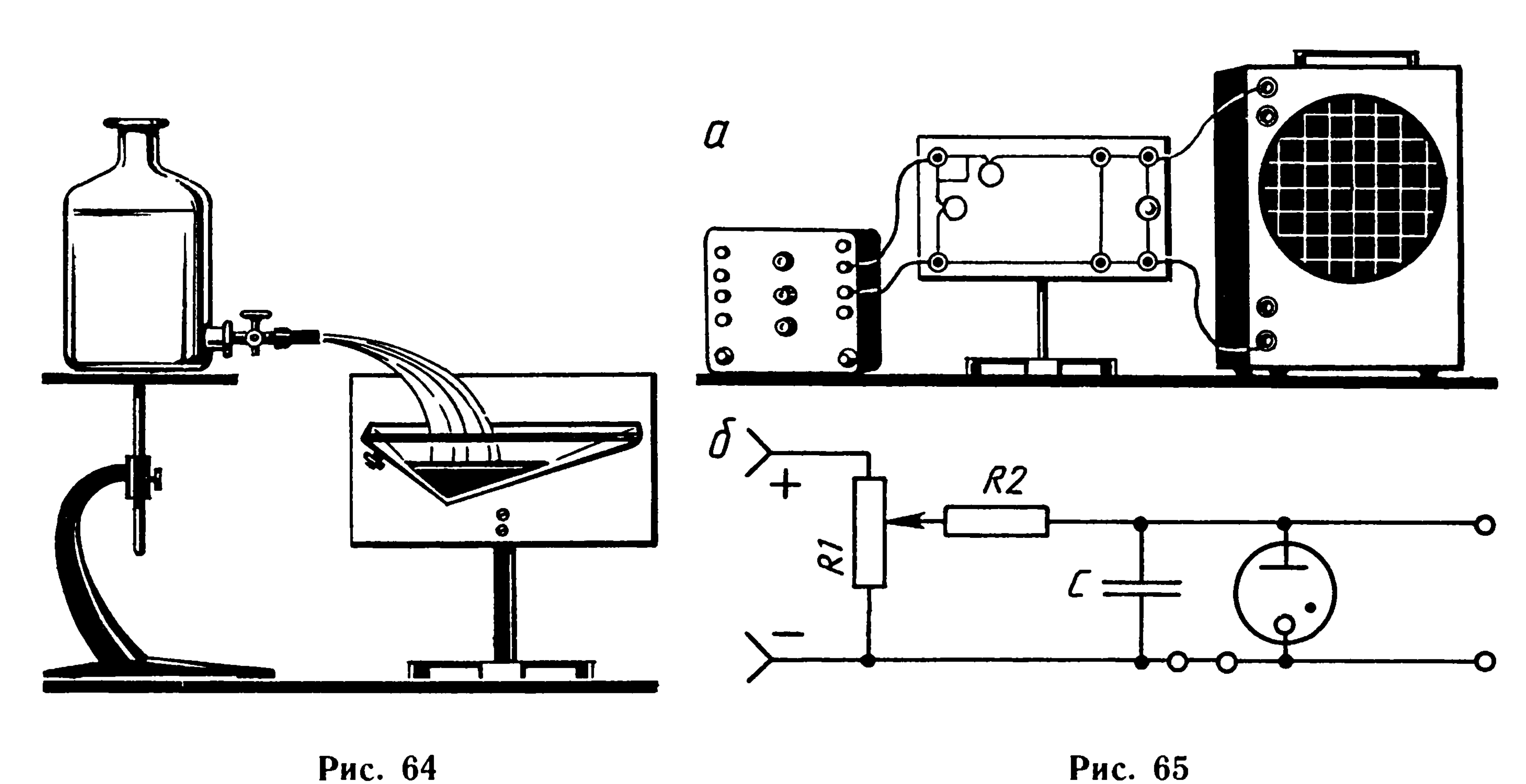


Рис. 64 Рис. 65

тора $R2$ — 100 кОм. Электроемкость конденсатора C порядка 0,1 мкФ. Все приведенные параметры некритичны и могут варьироваться в широких пределах. Вместо тиратрона МТХ-90 можно использовать неоновую лампу ТН-3. Включив выпрямитель, наблюдают периодические вспышки тиратрона. Подключив осциллограф, наблюдают осциллограмму пилообразной формы.

Объясняют, что при включении выпрямителя конденсатор C (см. рис. 65, *б*) заряжается через резистор $R2$. При этом чем больше сопротивление резистора $R2$, тем медленнее будет происходить заряд конденсатора. Аналогично влияет и емкость конденсатора C: чем она больше, тем дольше происходит зарядка. Очевидно также, что время заряда конденсатора зависит от ЭДС источника тока.

Строят график изменения напряжения (рис. 66). Построение графика сопровождают следующим пояснением. В момент t_1 напряжение между пластинами конденсатора достигает напряжения зажигания неоновой лампы. В лампе возникает тлеющий разряд, и ее сопротивление падает почти до нуля. При этом конденсатор быстро разряжается до напряжения гашения тлеющего разряда. Разряд прекращается, и конденсатор вновь начинает заряжаться. Затем в момент t_2 в лампе снова возникнет тлеющий разряд, и процесс повторится. На выходе получается переменное напряжение пилообразной формы.

За период колебаний напряжения на конденсаторе (от напряжения гашения $U_г$ неоновой лампы до напряжения зажигания $U_з$) протекает заряд

$$Q = (U_з - U_г)\,C = it,\ i \approx \frac{\mathscr{E}}{R}.$$

Отсюда

$$t \approx \frac{RC\,(U_з - U_г)}{\mathscr{E}}.$$

Если пренебречь временем разряда конденсатора, которое по сравнению с временем заряда мало, получим

$$T = \frac{U_з - U_г}{\mathscr{E}}\,RC.$$

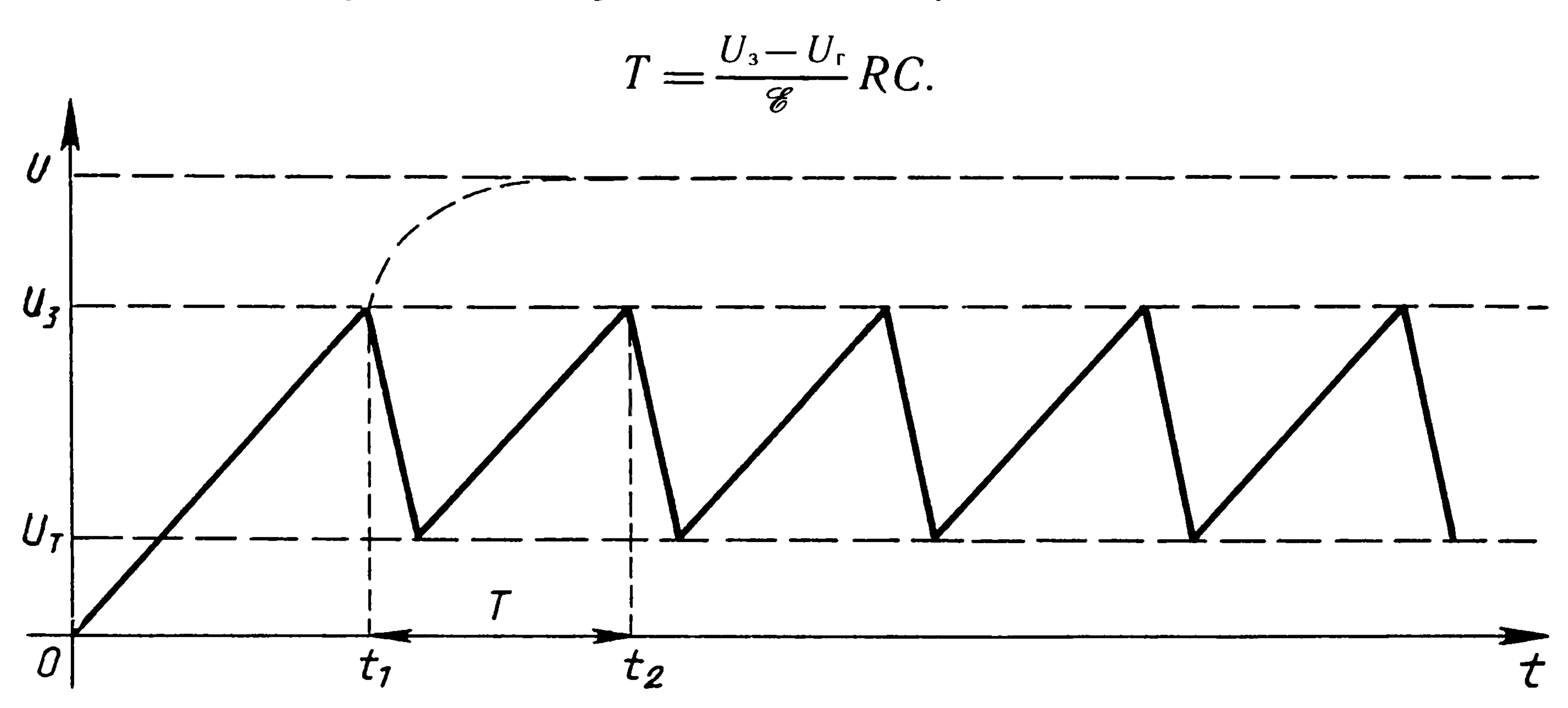


Рис. 66

Отсюда видно, что, подбирая необходимые сопротивление и емкость, можно получить пилообразные напряжения с различными периодами.

§ 7*. Параметрические колебания

Широкое применение в современной радиотехнике параметрических усилителей делает актуальным ознакомление учащихся, интересующихся физикой, с этим видом колебаний на внеклассных и факультативных занятиях.

Опыты 78—79*. Параметрическое возбуждение колебаний

Параметрические колебания возникают в колебательной системе при изменении ее параметров. Как видно из формулы

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

параметрами маятника являются его длина и ускорение свободного падения.

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 67. На нити подвешивают стальной шарик так, чтобы ее максимальная длина была 56 см, а минимальная — 53 см. Включив вибратор, подбирают частоту, при которой маятник начинает интенсивно раскачиваться. При выбранной длине маятника интенсивное раскачивание происходит при частоте 33 Гц.

Демонстрация может быть упрощена, если вибратор заменить асинхронным двигателем, вал которого делает 33 об/мин. Насадив на ось двигателя кривошип и установив нужную длину маятника, наблюдают параметрическое возбуждение колебаний маятника сразу же после включения двигателя.

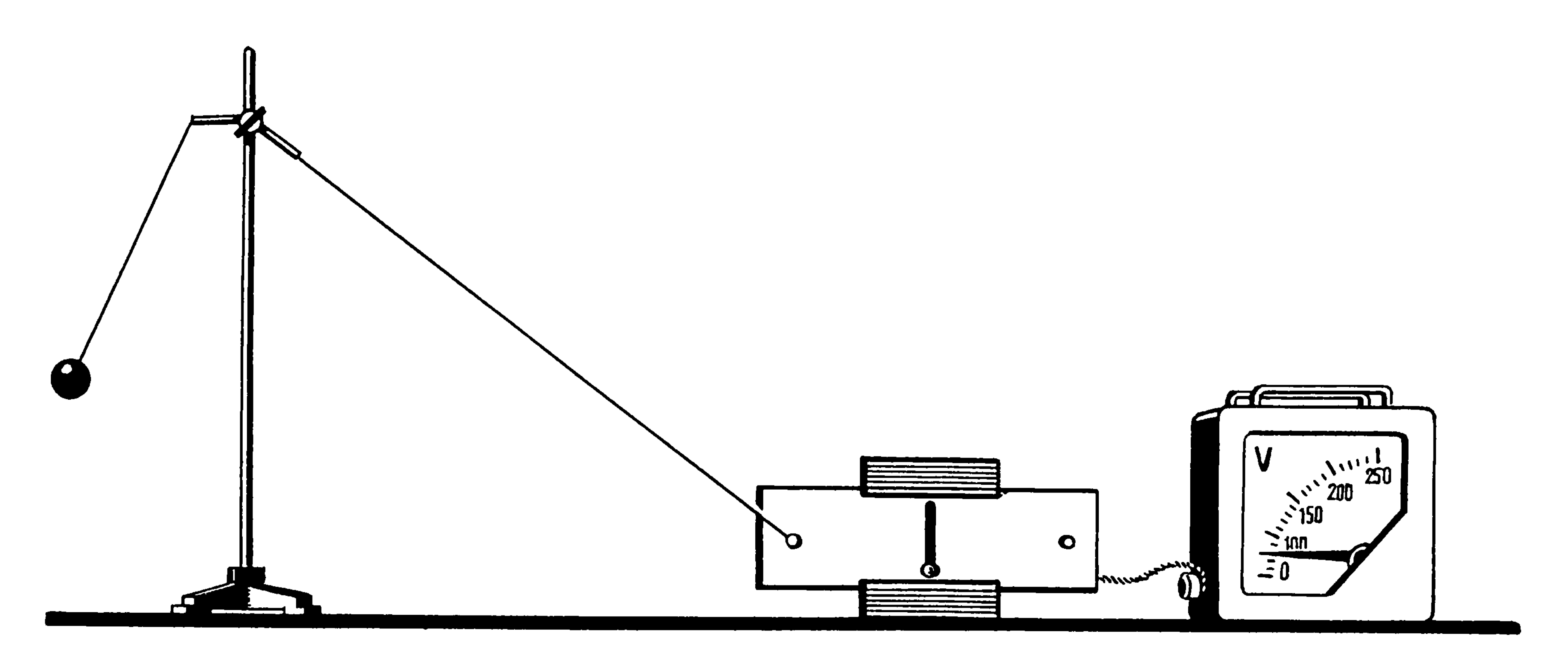


Рис. 67

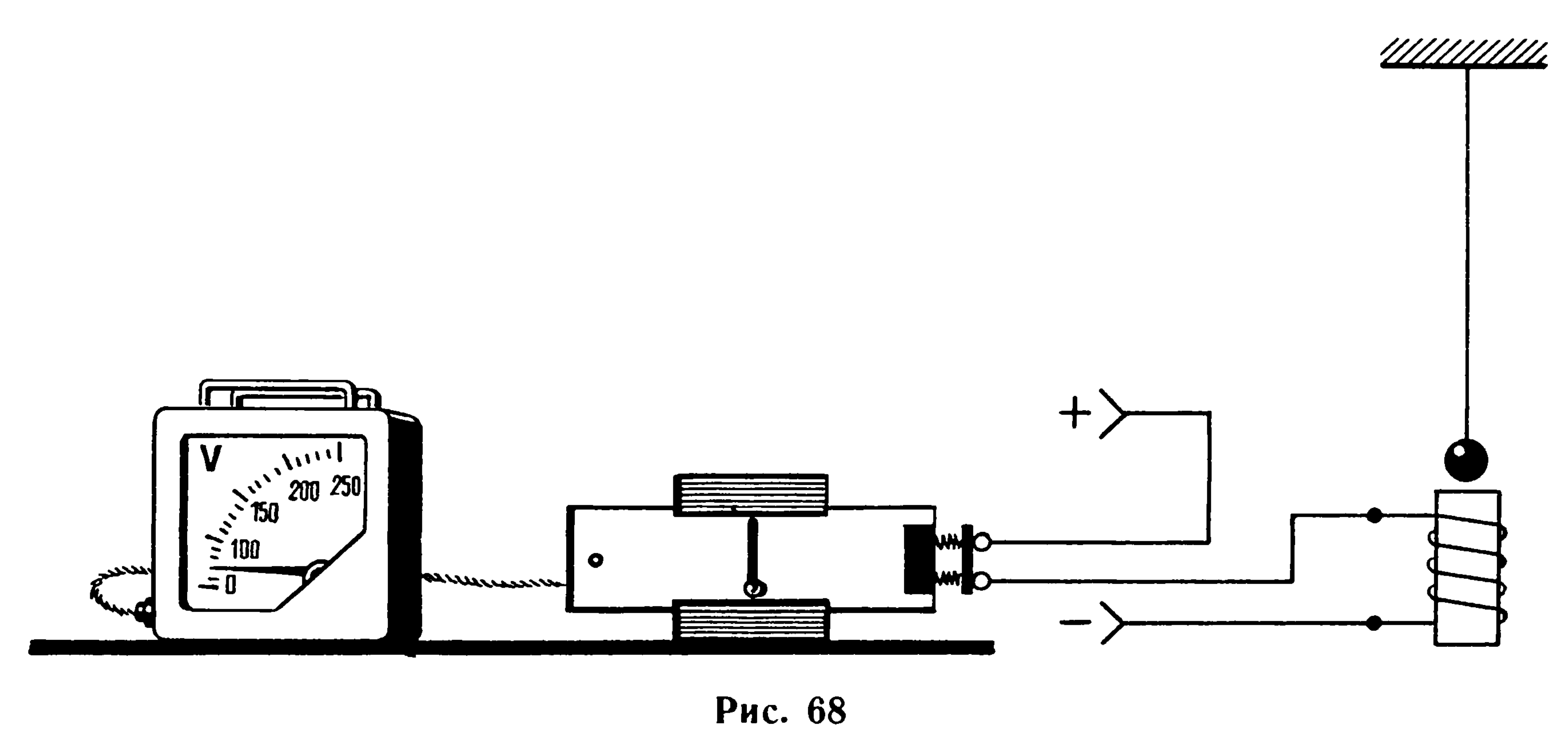


Рис. 68

2. Собирают установку, изображенную на рисунке 68. Шарик маятника должен быть стальным. На доске рисуют электрическую схему установки.

Включив вибратор, который теперь работает в режиме автоматического контактора, наблюдают параметрическое возбуждение колебаний.

Опыт 80*. Принцип работы параметрического усилителя

Чтобы объяснить принцип работы параметрического усилителя, на классной доске рисуют схему установки (рис. 69).

Объясняют, что колебательный контур настроен на частоту напряжения, даваемого звуковым генератором, и в контуре существуют вынужденные колебания, амплитуда которых зависит от параметров колебательной системы и напряжения.

Пусть одна из пластин конденсатора, включенного в контур, колеблется по гармоническому закону (рис. 69, *б*). В момент, когда конденсатор разряжен, пластины сдвигаются, а когда конденсатор заряжен, пластины раздвигаются.

При сближении пластин внешние силы не совершают работы, а при их раздвижении внешние силы совершают работу против сил электрического взаимодействия. Двигатель, приводящий пластины в движение, изменяет емкость конденсатора и, следовательно, передает в контур дополнительную энергию, и амплитуда сигнала на конденсаторе возрастает.

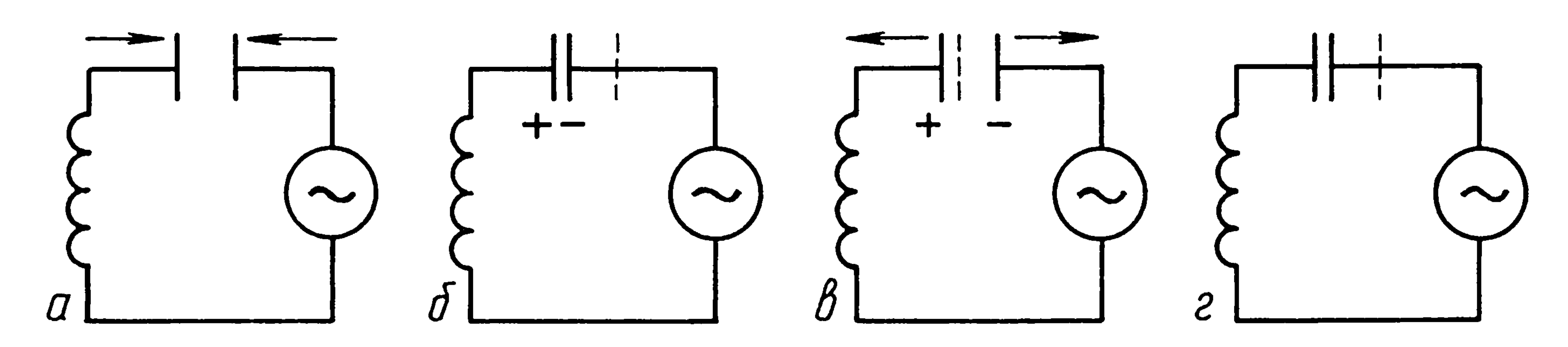


Рис. 69

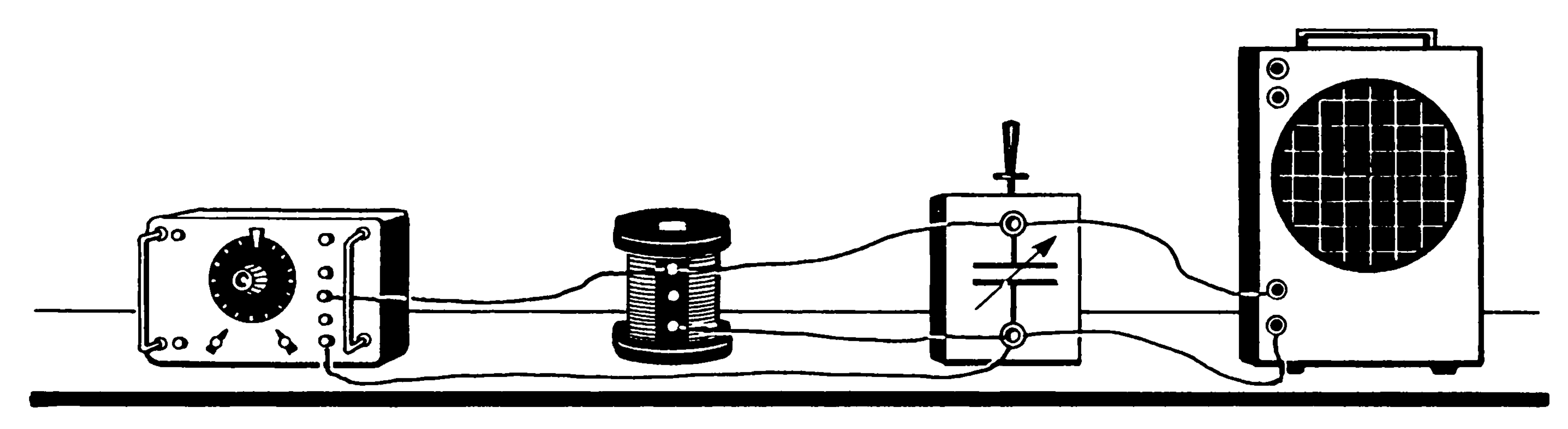


Рис. 70

Правильность объяснения проверяют на опыте (рис. 70).

Включают генератор звуковой частоты и подбирают амплитуду сигнала такой, чтобы на экране осциллографа была видна едва заметная осциллограмма. Включив двигатель, изменяющий емкость конденсатора, замечают, что амплитуда осциллограммы увеличивается. Изменяя скорость вращения ротора, добиваются максимальной амплитуды.

Отключают звуковой генератор и убеждаются, что на экране осциллограмма колебаний остается. Это значит, что в системе происходят колебания и наличие в цепи генератора вовсе не обязательно: начальный толчок мог возникнуть случайно.

§ 8*. Сложение колебаний

Существует большое число демонстрационных опытов, иллюстрирующих сложение механических колебаний. Их проведение, как правило, связано с необходимостью применять громоздкие установки и не всегда дает нужный эффект. Кроме того, со сложением механических колебаний приходится иметь дело нечасто. Чаще встречаются случаи сложения электрических колебаний.

Учитывая это, мы рассматриваем в основном сложение электрических колебаний. Само собой разумеется, что полученные при этом выводы справедливы и для механических колебаний.

Опыты 81—84. Сложение колебаний, совершающихся по одной прямой

1. Для демонстрации сложения колебаний собирают установку по схеме, изображенной на рисунке 71. В качестве трансформаторов *Тр1* и *Тр2* использованы так называемые «трансформаторы на панельках» из комплекта приборов для демонстрации передачи электрической энергии на расстояние. Низковольтные обмотки трансформаторов соединены последовательно, а напряжение с них подается на клеммы осциллографа. В качестве источника тока используется звуковой генератор, или регулятор напряжения школьный (РНШ), или регулируемое напряжение со школьного щита (КЭФ-10 или любого другого). Сначала замыкают ключ *К1* и наблюдают осциллограмму одного из слагаемых колебаний.

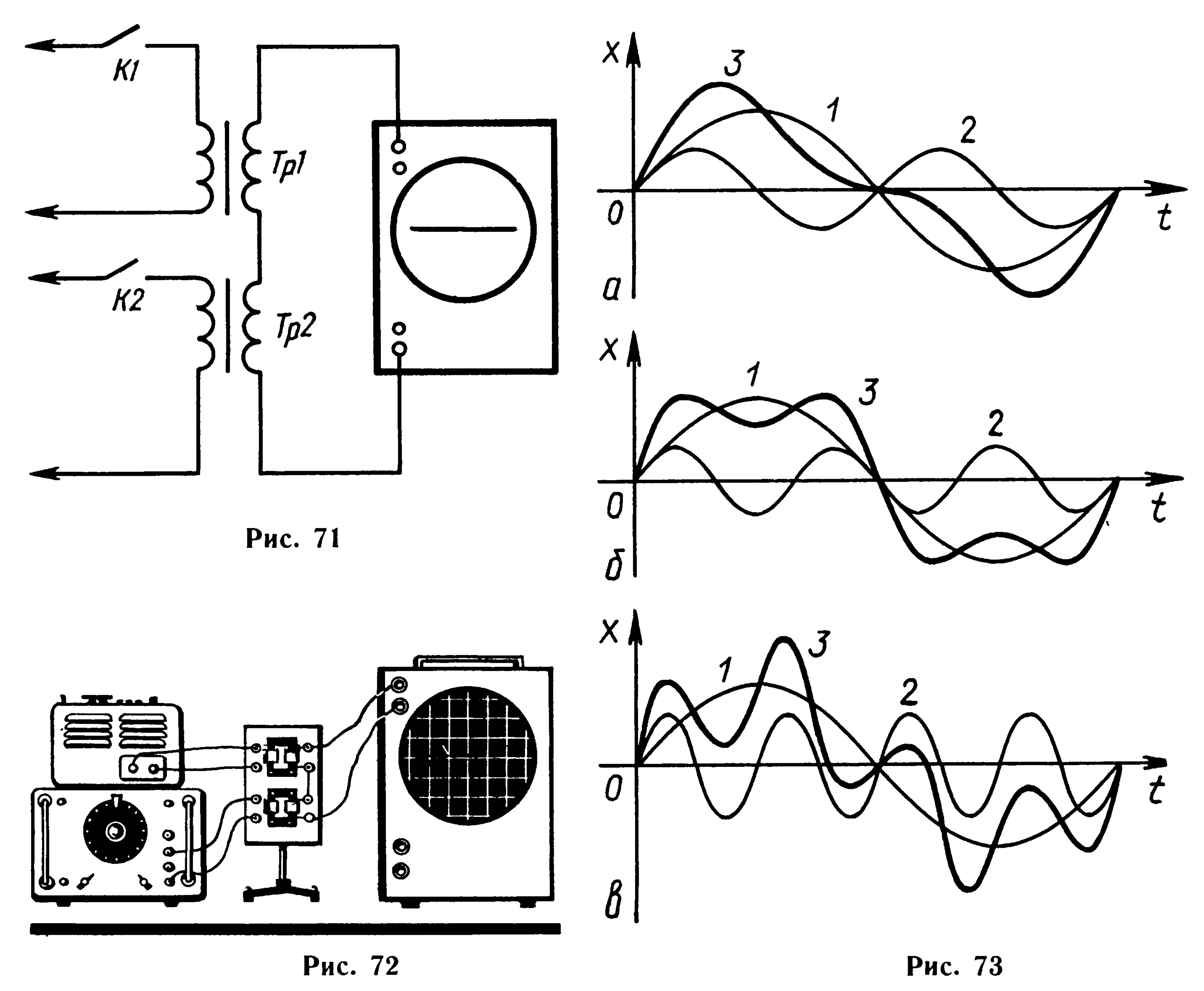


Рис. 71

Рис. 72

Рис. 73

Разомкнув ключ *К1*, замыкают ключ *К2* и наблюдают осциллограмму второго слагаемого колебания.

Наконец, замыкают оба ключа и наблюдают осциллограмму результирующего колебания.

2. Если у одной из первичных обмоток трансформатора поменять местами провода, можно будет наблюдать взаимное гашение колебаний: на экране видна прямая линия. Для успеха этого опыта важно подобрать практически одинаковые трансформаторы. В противном случае полного гашения не произойдет.

3. Для демонстрации сложения колебаний одинаковой частоты, но имеющих произвольный сдвиг по фазе, включают последовательно с первичной обмоткой одного из трансформаторов батарею конденсаторов. Возникающий сдвиг фаз зависит от соотношения между емкостью батареи конденсаторов и индуктивностью цепи.

По осциллограмме видно, что результирующее колебание также является гармоническим, а его частота равна частоте складываемых колебаний.

Меняя емкость батареи конденсаторов, убеждаются в том, что амплитуда результирующего колебания зависит от сдвига фаз между складываемыми колебаниями.

4. Для демонстрации сложения колебаний различных частот один из трансформаторов отключают от сети и присоединяют к генератору звуковой частоты (рис. 72).

Включив генератор, убеждаются в том, что результирующее колебание не является гармоническим. Обращают внимание учащихся на то, что форма результирующего колебания зависит от соотношения частот. Подбирают частоту колебаний, даваемых звуковым генератором, близкой к 50 Гц и наблюдают на экране осциллограмму биений.

5. Весьма важно показать сложение колебаний с кратными частотами. Для этого со звукового генератора снимают колебания с частотами 100 и 150 Гц. На экране наблюдают осциллограммы, изображенные на рисунке 73.

Обращают внимание учащихся на то, что результирующее колебание является периодическим. Частота результирующего колебания равна наименьшей частоте ω_0, которую называют основной частотой. Частоты, кратные основной частоте, называются гармониками.

Установив кратные частоты, наблюдают форму результирующего колебания. Затем включают в первичную цепь одного из трансформаторов батарею конденсаторов. Замечают, что форма результирующего колебания изменилась. Делают вывод, что форма результирующего колебания зависит не только от соотношения частот, но и от фаз складываемых колебаний.

Опыты 85—87*. Сложение колебаний, происходящих в перпендикулярных направлениях

1. Для демонстрации сложения колебаний одинаковой частоты зажимают в тисках, укрепленных на демонстрационном столе, стальную спицу, на конце которой укреплен металлический шарик. Отводят шарик в сторону (влево или вправо — безразлично) и наблюдают колебания шарика в горизонтальной плоскости.

Резко, но не очень сильно ударяют по шарику. В зависимости от направления и силы удара маятник после этого движется либо по прямой линии (рис. 74), либо по эллипсу или окружности (рис. 75). Вид новой траектории маятника, как показывает опыт, зависит еще от того, при какой фазе начального колебания был нанесен удар.

Для простоты анализа допускают, что разность фаз колебаний равна нулю ($\varphi=0$). Тогда движение маятника по осям x и y описывается уравнениями

$$x=X_m \sin \omega t,\quad y=Y_m \sin \omega t.$$

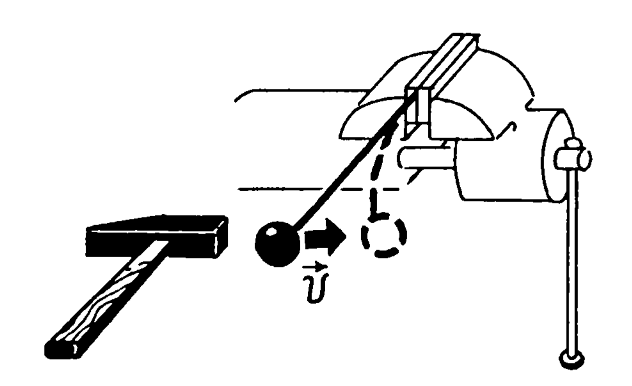


Рис. 74

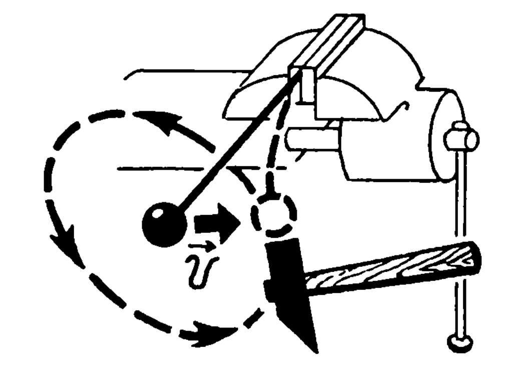


Рис. 75

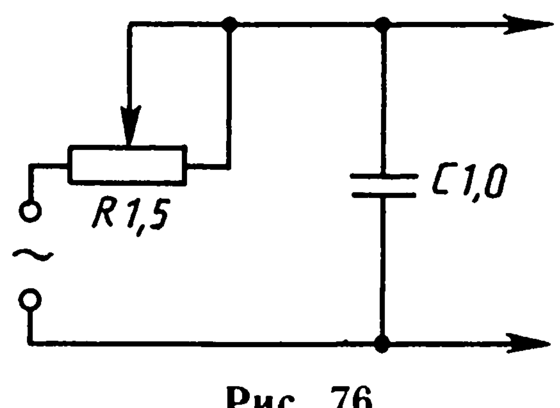


Рис. 76

Исключая из этих выражений время t, приходим к уравнению траектории результирующего колебания:

$$y=\frac{X_m}{Y_m}x.$$

Это уравнение прямой линии. Коэффициент $\frac{X_m}{Y_m}$ определяет наклон этой линии по отношению к выбранным осям координат.

Если разность фаз равна четверти периода $\varphi=\frac{\pi}{2}$, то движение маятника описывается уравнениями

$$x=X_m \sin \omega t,\ y=Y_m \sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)=Y_m \cos \omega t,$$

или

$$\frac{x}{X_m}=\sin \omega t,\ \frac{y}{Y_m}=\cos \omega t.$$

Отсюда получаем уравнение траектории:

$$\frac{x^2}{X_m^2}+\frac{y^2}{Y_m^2}=1.$$

Это уравнение эллипса. Следовательно при разности фаз, равной четверти периода, траектория результирующего колебания — эллипс. В частном случае, когда амплитуды одинаковы, траектория представляет собой окружность.

Теперь допустим, что разность фаз слагаемых колебаний равна половине периода $(\varphi=\pi)$. Тогда

$$x=X_m \sin \omega t,\ y=-Y_m \sin \omega t.$$

Отсюда

$$y=-\frac{X_m}{Y_m}x.$$

Результирующие колебания в этом случае происходят, как и при $\varphi=0$, по прямой линии, но расположение этой прямой в пространстве иное.

Наконец, рассматривают случай, когда $\varphi=\frac{3}{4}\pi$. В этом случае

$$x=X_m \sin \omega t,$$
$$y=-Y_m \cos \omega t.$$

Уравнение траектории имеет вид

$$\frac{x^2}{X^2}+\frac{y^2}{Y_m^2}=1,$$

т. е. движение маятника происходит по эллипсу.

2. Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты можно показать и на примере колебаний электронного пучка в электронно-лучевой трубке электронного осциллографа. Для этого в осциллографе выключают горизонтальную развертку и на пластины горизонтального отклонения, расположенные на задней панели осциллографа, подают напряжение от сети через автотрансформатор. На экране осциллографа наблюдают горизонтальную прямую, что свидетельствует о колебаниях электронного пучка в горизонтальной плоскости.

Регулируя напряжение, подаваемое на пластины горизонтального отклонения, добиваются, чтобы светящаяся горизонтальная линия занимала примерно $^2/_3$ диаметра экрана осциллографа.

Снимают напряжение с пластин горизонтального отклонения и подают напряжение с автотрансформатора на вертикальный вход осциллографа. На экране появляется вертикальная светящаяся прямая линия. Регулируя усиление вертикального входа, добиваются, чтобы эта прямая также занимала примерно $^2/_3$ диаметра экрана.

Вновь подают сигнал на пластины горизонтального отклонения от автотрансформатора. На экране наблюдают прямую линию, расположенную под углом 45° к горизонту. Меняя усиление вертикального входа осциллографа, показывают, что угол наклона зависит от соотношения амплитуд складываемых колебаний.

Для наблюдения сложения колебаний одинаковой частоты, но с произвольным сдвигом по фазе подключают к вертикальному входу осциллографа устройство, схема которого изображена на рисунке 76. Меняя сопротивление резистора, регулируют фазу колебаний напряжения и на экране наблюдают либо эллипс, либо окружность, либо прямую линию.

3. Для демонстрации сложения перпендикулярных колебаний разных частот видоизменяют предыдущую установку: на вертикальный вход осциллографа подают напряжение от звукового генератора, а на горизонтальный — по-прежнему напряжение от автотрансформатора.

Выключив звуковой генератор, регулируют напряжение, даваемое автотрансформатором, и добиваются, чтобы горизонтальная линия на экране осциллографа была равна примерно $^2/_3$ диаметра экрана. Выключив автотрансформатор, регулируют усиление по вертикали и добиваются, чтобы вертикальная линия на экране осциллографа также была равна $^2/_3$ диаметра экрана.

Включив оба источника напряжения, устанавливают одинаковые частоты и наблюдают на экране уже знакомые фигуры Лиссажу (рис. 77), которые все время изменяются. Объясняют, что это происходит потому, что разность фаз колебаний напряжения, подаваемого от звукового генератора и от сети, постоянно меняется.

Затем увеличивают частоту колебаний напряжения, подаваемого от звукового генератора, и наблюдают фигуры, показанные на рисунках 77, *б, в, г, д*.

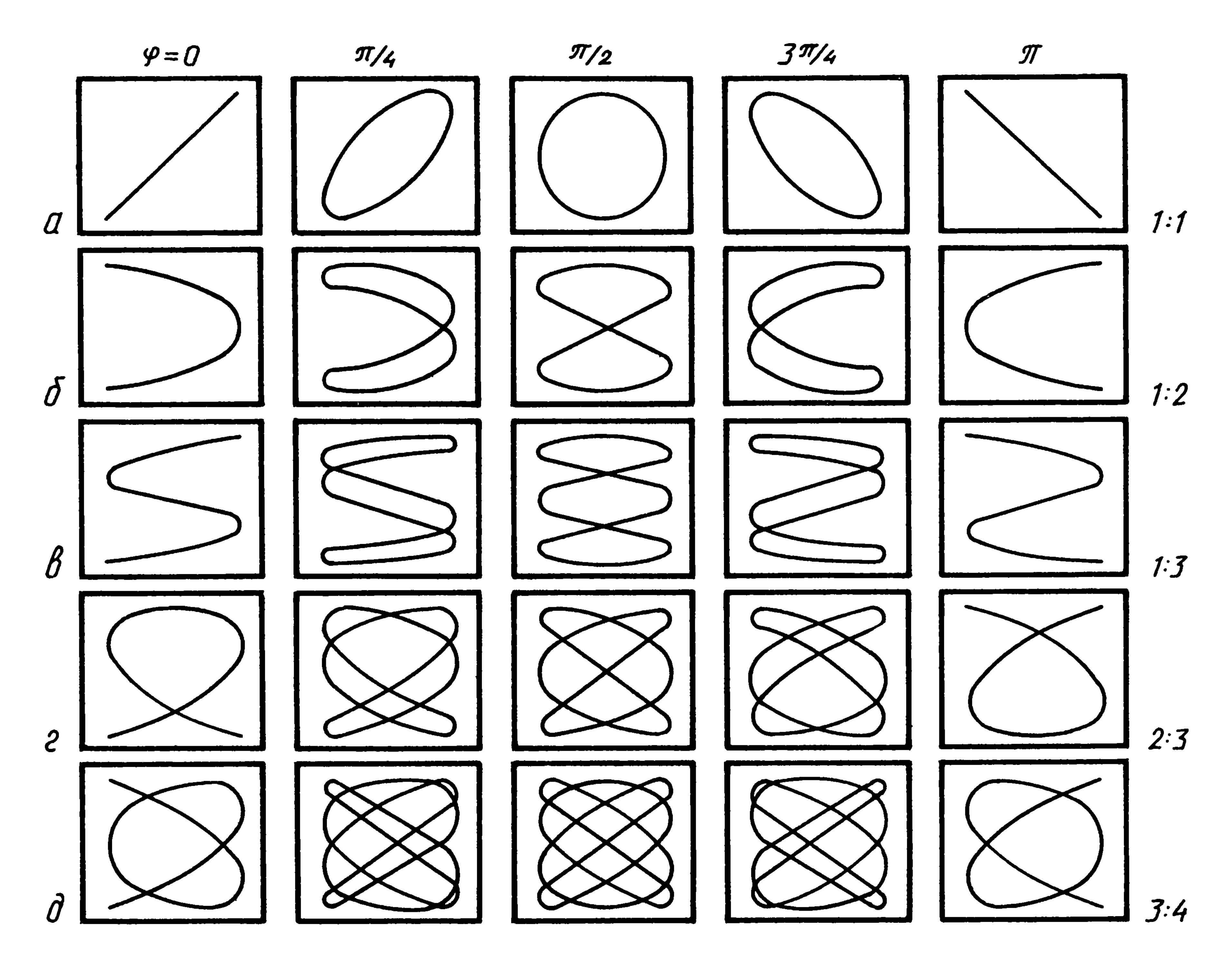


Рис. 77

Опыт 88*. Разложение периодического сигнала на гармонические составляющие

Для того чтобы показать возможность разложения сложного периодического сигнала на гармонические составляющие, помещают около радиоприемника генератор пилообразного напряжения. Установив переключатель диапазонов на прием длинных волн, включают радиоприемник и генератор пилообразного напряжения.

На классной доске рисуют схему опыта, показанную на рисунке 78.

Объясняют, что пилообразные колебания очень богаты гармониками. При изменении емкости конденсатора входного контура радиоприемника последний будет выделять из пилообразного сигнала его гармонические составляющие и на выходе приемника будут сигналы, соответствующие этим гармоникам.

Присоединив параллельно громкоговорителю приемника высокочастотный электронный осциллограф, можно осциллограмму выделенного сигнала наблюдать на экране.

Опыт особенно наглядно получается с приемником прямого усиления, в котором обратная связь установлена на собственную генерацию. В этом случае каждая гармоника при настройке на нее приемника прослушивается в виде характерного свиста.

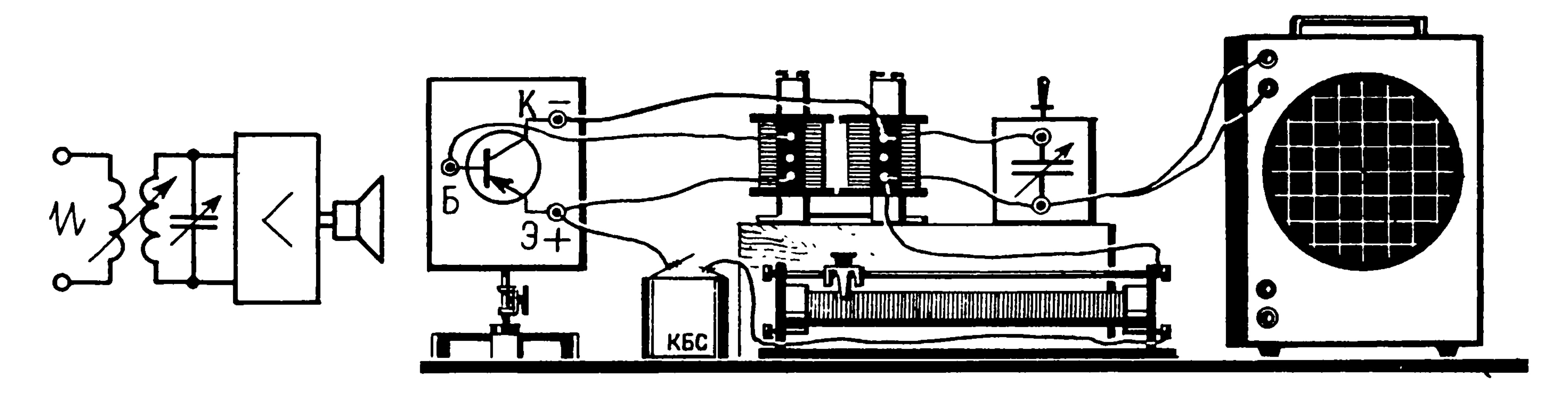


Рис. 78 Рис. 79

Если в кабинете есть простейший анализатор спектра (его описание дано в § 16) в виде перестраиваемого контура с высокой добротностью, можно опыт поставить следующим образом. На вход спектрального прибора подают сигнал с мультивибратора или с однополупериодного выпрямителя, а на выход подключают электронный осциллограф (см. рис. 27).

Изменяя емкость конденсатора, включают первый диапазон частот. Плавно изменяя индуктивность катушки, добиваются максимальной амплитуды первой гармоники. Затем, переключая диапазоны и плавно изменяя индуктивность, находят вторую, третью и четвертую гармоники. Объясняя опыт, сообщают учащимся, что такой способ анализа периодического сигнала называется последовательным.

§ 9. Модуляция колебаний

Обычно принципы модуляции и детектирования колебаний рассматриваются бегло при изучении физических основ радиосвязи. Между тем достаточно основательное изучение этих вопросов способствует более глубокому усвоению физики.

Остановимся вначале на том, какой материал, касающийся вопросов модуляции, необходимо предложить школьникам для изучения.

Электромагнитные колебания $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ характеризуются тремя не изменяющимися с течением времени параметрами: частотой колебаний ω, амплитудой U_m и начальной фазой φ_0. Такие колебания не несут никакой информации. Для передачи сообщения необходимо изменять один из параметров высокочастотных колебаний в соответствии с управляющим сигналом (речь, музыка, сигнал изображения, кодированные сигналы управления и т. д.).

Процесс изменения параметров высокочастотного колебания по закону изменения управляющего сигнала называют модуляцией колебаний. Управляющий сигнал часто называют модулирующим сигналом.

Различают три вида модуляции: амплитудную, частотную и фазовую. Соответственно возможны три вида модулированных коле-

баний: амплитудно-модулированные, частотно-модулированные и колебания, модулированные по фазе.

В средней школе нужно достаточно подробно изучить физические основы амплитудной модуляции. Необходимость рассмотрения модуляции вытекает из того, что ее изучение способствует более глубокому пониманию физической сущности радиосвязи.

Амплитудную модуляцию колебаний можно осуществить, изменяя напряжение на электродах транзистора.

В зависимости от того, в какую цепь транзистора вводится модулирующий сигнал, различают два вида амплитудной модуляции: базовую и коллекторную. Поскольку в основе обоих видов модуляции лежит один и тот же принцип, для изучения в школе надо выбрать тот, который проще, доступнее и к тому же может быть показан экспериментально с помощью имеющегося комплекта школьного оборудования. Этим требованиям в большей мере удовлетворяет коллекторная амплитудная модуляция. Что касается частотной модуляции, то изучать ее в средней школе нецелесообразно.

Для того чтобы учащиеся могли достаточно обстоятельно разобраться в сущности процессов, используемых при радиосвязи, им надо сообщить основные сведения о спектре модулированных колебаний.

Ниже описаны опыты, в которых реализуются высказанные здесь методические соображения.

Опыт 89. Однотональная амплитудная модуляция

В начале урока, посвященного изучению модуляции колебаний, повторяют с учащимися принцип устройства и работы автогенератора и напоминают, что амплитуда электромагнитных колебаний в колебательном контуре генератора зависит от напряжения на коллекторном переходе. Это напоминание сопровождают демонстрацией опыта. Для этого собирают установку, которую использовали при изучении принципа устройства и работы автоустройства и автогенератора (см. рис. 58 и 59). Включив в коллекторную цепь реостат сопротивлением в несколько килоом (рис. 79), демонстрируют зависимость амплитуды колебаний от напряжения в коллекторной цепи.

Заменив реостат понижающей обмоткой «трансформатора на панельке», убеждаются в том, что генератор работает. Параллельно обмотке трансформатора включен конденсатор *C1* электроемкостью в десятые доли микрофарада. Этот конденсатор необходим для пропускания высокочастотной составляющей тока. Поскольку конденсатор *C1* — вспомогательная часть цепи, его следует подсоединить к клеммам трансформатора с обратной стороны панельки.

Подключают к первичной обмотке трансформатора генератор звуковой частоты (рис. 80) и наблюдают осциллограмму модулированных колебаний. Изменяя напряжение сигнала, снимаемого со звукового генератора, знакомят учащихся с понятием о глубине модуляции.

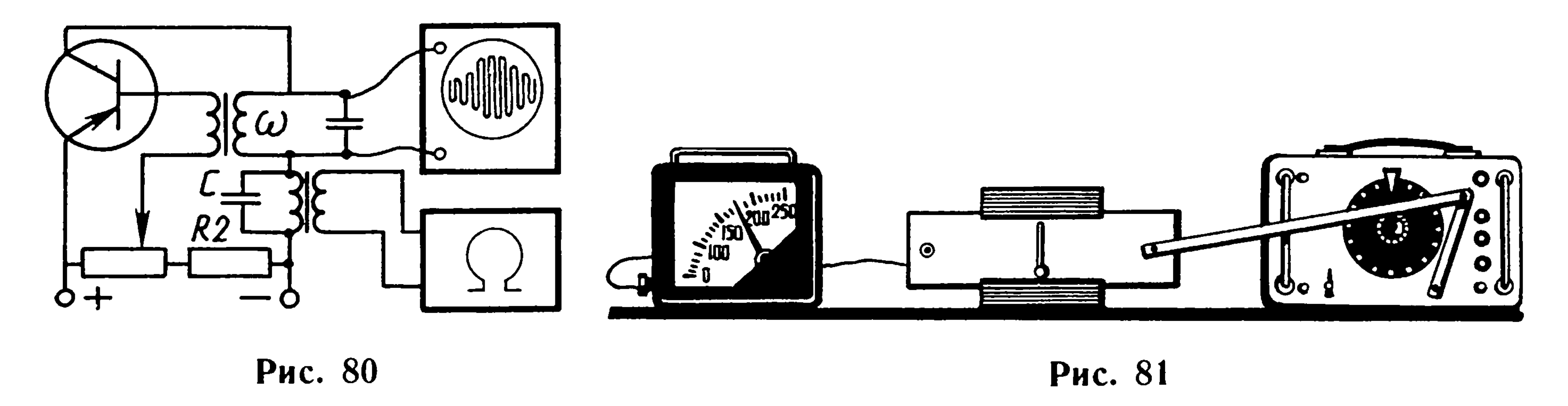


Рис. 80　　　　　　　　Рис. 81

В заключение сообщают, что модуляция гармоническим сигналом называется однотональной.

Для успешной постановки опыта существенно важно, чтобы собранный генератор работал в перенапряженном режиме: только в этом случае изменение напряжения на коллекторном переходе оказывает сильное влияние на коллекторный ток (точнее, на первую гармонику коллекторного тока).

Опыт 90*. Спектральный состав однотонально модулированного сигнала

Для постановки описанного ниже опыта необходим генератор однотонально модулированных сигналов низкой частоты. В школьных кабинетах такого генератора нет, но его несложно собрать из имеющихся в кабинете деталей. Например, соединив регулятор напряжения выхода генератора звуковой частоты с демонстрационным вибратором (рис. 81), можно на выходе получить амплитудно-модулированный сигнал. Еще проще можно получить модулированный сигнал с помощью потенциометрического генератора, предложенного много лет тому назад М. А. Ушаковым. В этом случае реостат на 50—60 Ом включается на выход школьного регулятора напряжения в качестве потенциометра, на выход которого подключается стандартный язычковый частотомер (рис. 82).

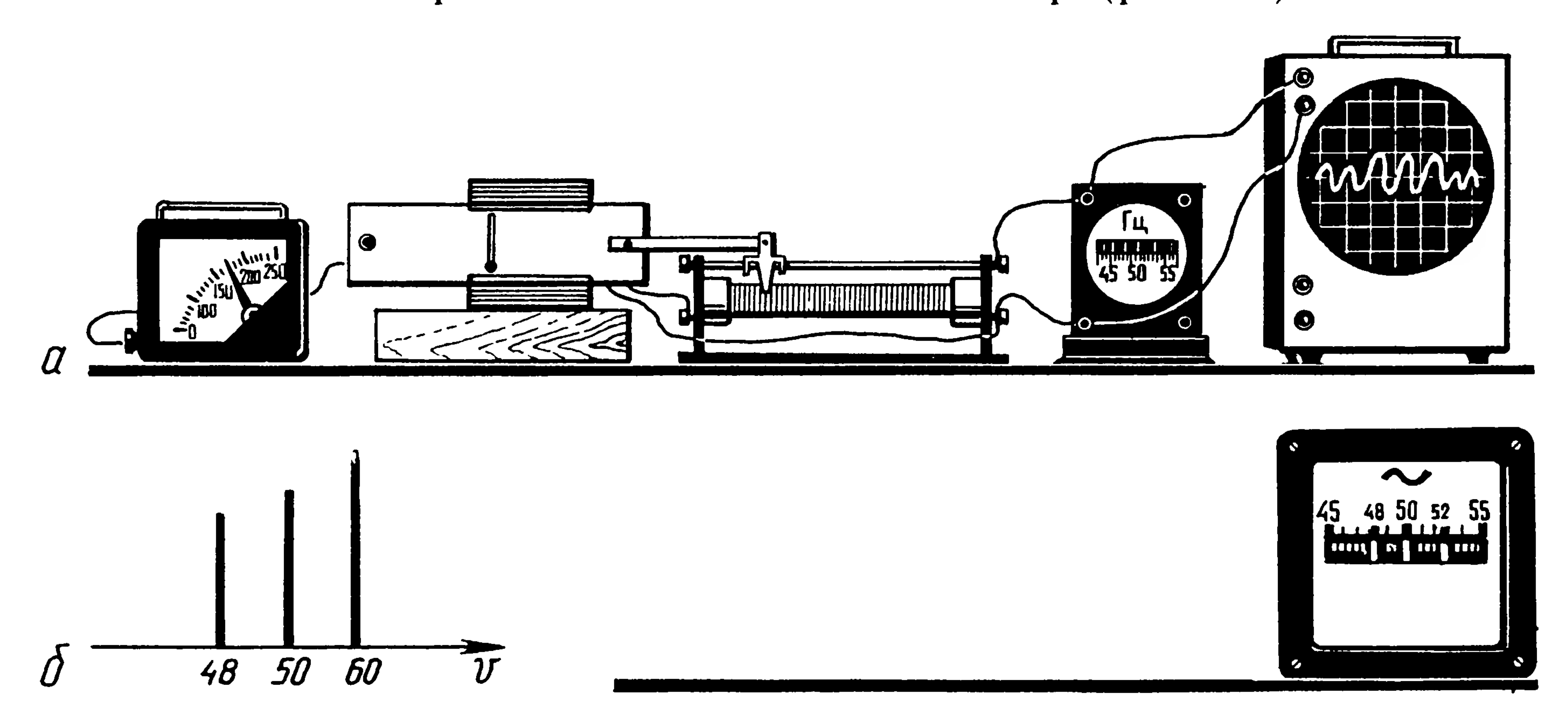


Рис. 82

Собрав установку, изображенную на рисунке 82, *а* демонстрируют, что частотомер отмечает частоту переменного тока — 50 Гц.

Включив вибратор (частота колебаний которого до урока должна быть тщательно подобрана равной 2 Гц), наблюдают на экране осциллографа изменение амплитуды осциллограммы.

Обращают внимание учащихся на то, что в этом случае вибрируют язычки частотомера, настроенные на частоты 48, 50 и 52 Гц. Таким образом, опыт свидетельствует, что колебания, модулированные однотональным сигналом, содержат три немодулированных гармонических колебания: колебания несущей частоты 50 Гц и колебания с частотами 48 и 52 Гц (боковые частоты).

Частотный спектр модулированных колебаний показан на рисунке 82, *б*. Наибольшую амплитуду имеет язычок с частотой 50 Гц.

Глава II. ВОЛНЫ

При едином подходе к изучению колебательных и волновых процессов сначала изучают основные свойства, присущие волнам любой природы. Затем знакомят учащихся со специфическими свойствами звуковых, электромагнитных и световых волн и с их применением в науке и технике. При этом, разумеется, углубляются знания учащихся и об общих свойствах волн и общих закономерностях волновых процессов.

С методической точки зрения целесообразно вначале, при изучении общих свойств волн, широко использовать волны на поверхности воды из-за их наглядности, хотя с практической точки зрения несравненно больший интерес представляют свойства и особенности акустических и электромагнитных волн.

§ 10. Предварительные сведения о волнах

Изучая колебательное движение, учащиеся имели дело с изолированными колебательными системами. Однако большое значение имеют колебательные системы, связанные друг с другом. В этом случае колебания передаются от одной колебательной системы к другой. Это, в частности, имеет место при распространении волны.

Описанные в этом параграфе опыты предназначены для введения первоначальных сведений о волнах и характеризующих их параметрах.

Опыт 91. Распространение колебаний

Чтобы ввести понятие о волне и объяснить, каким образом механические колебания от одной колебательной системы передаются к

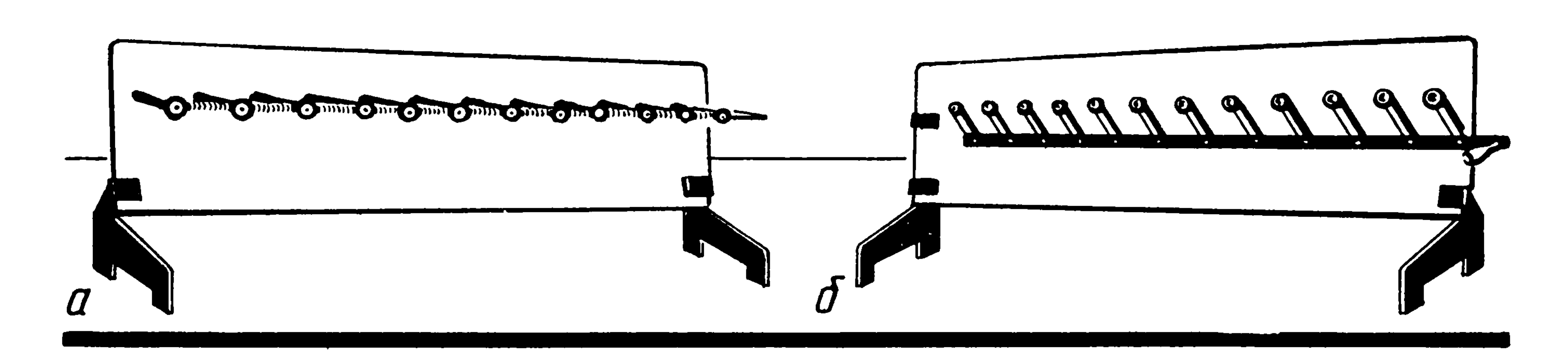


Рис. 83

другой, используют прибор, показанный на рисунке 83 (описание прибора дано в § 16). В этом приборе к массивной раме прикреплены с помощью специальных зажимов 12 тонких стальных пластин. К свободным концам этих пластин прикреплены металлические цилиндры диаметром 15 мм, окрашенные в белый цвет. В раму прибора вставлена черная панель с 12 отверстиями, сквозь которые проходят зажимы стальных пластин. Белые цилиндры хорошо видны на фоне черной панели.

Каждая стальная пластина с цилиндром является пружинным маятником с периодом колебаний, равным примерно 1 с. Все маятники соединены друг с другом специально подобранными одинаковыми пружинами, которые прикреплены к муфтам, надетым на массивные цилиндры. С помощью специального рычага пластины маятников могут поворачиваться на 90°. Благодаря наличию муфт пружины, соединяющие маятник, не изменяют своего положения.

Отсоединив пружину от первого маятника, показывают, что он может колебаться в вертикальной плоскости. Затем этот маятник снова соединяют пружиной с остальными маятниками и повторяют опыт. В этом случае колебания от первого маятника передаются ко второму, от второго — к третьему и т. д. По системе маятников пробегает волна.

Обращают внимание учащихся на то, что направление колебаний каждого маятника и направление распространения колебаний от маятника к маятнику взаимно перпендикулярны. На этом основании вводят понятие о поперечных волнах и о длине волны.

Повернув пластины маятников на 90°, повторяют опыт с той лишь разницей, что первый маятник заставляют колебаться в горизонтальной плоскости. Наблюдают образование сгущений и разрежений. Это наблюдение позволяет ввести понятие о продольной волне.

Опыт 92. Поперечные волны

Описанный выше опыт наглядно раскрывает механизм передачи колебаний от одной колебательной системы к другой. Но это, по существу, модельный опыт. Вслед за ним нужно еще показать распространение волны в упругой среде. Сначала демонстрируют распространение одиночного импульса, а затем бегущей волны. Для проведения этого опыта присоединяют резиновую трубку длиной

около 2 м к блоку (его описание дано в § 16), снабженному тормозом. В процессе подготовки опыта добиваются такого трения блока о тормоз, установленный в обойме, при котором практически не происходит отражения волн. Блок закрывают от учащихся непрозрачным экраном и на работе тормоза не останавливаются (о действии тормоза и его роли рассказывают учащимся на более поздней стадии изучения волновых процессов). Свободный конец трубки присоединяют к вибратору. Ударяют по трубке линейкой и наблюдают распространение волнового импульса. Далее включают вибратор (частоту колебаний надо подобрать в процессе подготовки опыта) и наблюдают в трубке бегущие волны от вибратора к блоку. Пользуясь стробоскопом, демонстрируют «замедленное» движение волн по стержню в замедленном темпе. Для получения уравнения волны рисуют на доске схему, показанную на рисунке 84. Допустив, что колебания вибратора совершаются по закону:

$$x = X_m \sin \omega t$$

и что они распространяются вдоль трубки без затухания со скоростью v, находят закон колебаний произвольной точки K, удаленной от вибратора на расстояние y. В эту точку колебания придут с запозданием на время $\tau = \frac{y}{v}$, и колебания в этой точке будут происходить по закону:

$$x = X_m \sin \omega (t - \tau),$$

или

$$x = X_m \sin \omega \left(t - \frac{y}{v} \right).$$

Сообщают учащимся, что полученное выражение называется уравнением бегущей волны.

Опыт 93. Продольные волны

Длинную стальную пружину[1] подвешивают на проволоке горизонтально над демонстрационным столом (рис. 85). Один конец пружины прикрепляют к стержню от универсального штатива, прикрепленному к столу с помощью струбцин, за второй конец пружину слегка растягивают и привязывают с помощью тонкой резинки ко второму штативу. Чтобы проволока заметно не прогнулась под действием силы тяжести, над ней натягивают вторую проволоку и с помощью нитей подтягивают к ней нижнюю проволоку с пружиной.

[1] Такую пружину нетрудно изготовить из стальной проволоки диаметром около 1 мм. Диаметр стержня, на который следует намотать проволоку, около 50 мм (при снятии пружины со стержня диаметр пружины увеличивается). Если изготовить пружину не удается, можно использовать проволоку от старого, вышедшего из строя низкоомного реостата.

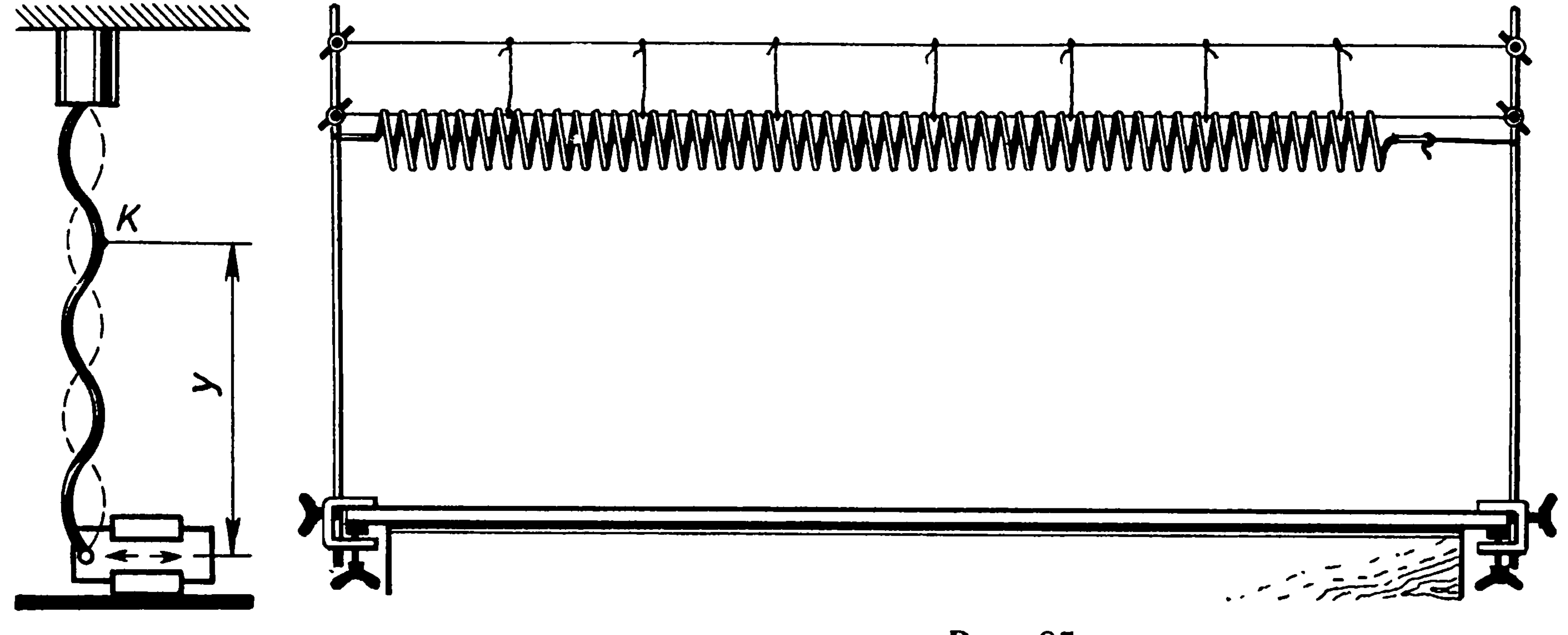


Рис. 84

Рис. 85

Ударив линейкой по торцу пружины, наблюдают распространение продольной волны. Для большей выразительности опыта следует сзади пружины поставить белый экран или натянуть рулон белой бумаги. Выразительность демонстрации повышается, если пружину спереди осветить.

Опыты 94—95. Волны на поверхности воды

Опыты с волновой ванной многократно описаны. Однако техника их постановки не разработана и не описана достаточно тщательно, что часто приводит к весьма невыразительной демонстрации этих опытов и к их низкой эффективности. Учитель, ставя опыты, не уверен в том, что они пройдут удачно. Ниже описана техника постановки опытов с волновой ванной, которая исключает неудачи и обеспечивает высокую эффективность эксперимента.

Условия успешной постановки опытов

Для успешного осуществления опытов с волновой ванной существенно важно соблюдение следующих условий:

1. Вибратор должен работать стабильно со строго постоянной частотой колебаний, которую можно было бы плавно регулировать в пределах от 1 до 10 Гц. Амплитуда колебаний должна быть при работе с плоской насадкой в пределах от 0,5 до 1 мм, с точечной насадкой — от 2 до 3 мм. Насадка при работе не должна полностью выходить из жидкости.

2. В качестве жидкости можно использовать хорошо прокипяченную воду (толщина ее слоя может колебаться от 2—3 до 7—8 мм).

3. Насадка для возбуждения плоских волн должна быть лишь на 1—2 мм меньше ширины ванны. В этом случае фронт возбуждаемых волн получается плоским и снижается влияние краевых эффектов. Кроме того, исключается влияние заднего фронта волны после ее отражения от бортика ванны. Насадку для возбуждения кольцевых волн лучше всего изготовить в виде цилиндра диаметром 1—2 мм.

4. Выпускаемая промышленностью ванна позволяет достаточно выразительно поставить большинство опытов. Однако они идут значительно лучше, если увеличить длину ванны примерно на 5—6 см, ширину — на 3—4 см, а глубину — на 2 см. Ванну лучше установить на четырех винтах.

5. Пологие края ванны достаточно хорошо гасят падающие на них волны. Однако гашение улучшится, если на борта ванны положить грубую стеклоткань. (В этом случае набегающие волны просачиваются сквозь ткань подобно тому, как морские волны просачиваются сквозь гальку, и не отражаются.) Использование именно стеклоткани желательно еще и потому, что она не гниет и быстро сохнет. Если стеклоткани нет, используют грубую мешковину.

6. Источник света должен быть близок к точечному. Не следует стремиться использовать очень мощный источник света: при большой яркости источника выразительность опыта падает, так как ряд существенных деталей исчезает. Очень удобен осветитель для теневой проекции, выпускаемый промышленностью Главучтехпрома.

7. Четкость демонстрируемых явлений увеличивается, если сверху на ванну помещается прямоугольная рамка, прикрывающая края ванны. Размеры рамки должны быть несколько меньше размеров зеркала.

8. Ванна должна быть установлена строго горизонтально. При таком ее положении плоские волны не испытывают деформации, строго параллельны вибратору и практически не затухают.

9. Вибратор лучше поместить в подставке от универсального штатива, а не крепить к ванне.

Хорошее качество демонстрации волн на поверхности воды обеспечивает схема, показанная на рисунке 86. Волновую ванну *В* устанавливают на выдвинутые из стола брусья. Световой поток от осветителя *S*, пройдя через ванну, падает на плоское зеркало *З*, установленное под углом 45° к горизонту, и отражается на просветный экран.

Экран изготавливают так. Концы полотнища кальки длиной примерно 2 м приклеивают к двум деревянным палочкам диаметром 10 мм. После того как засохнет клей, кальку наматывают в 3—4 слоя на палочки. Образовавшийся «транспарант» вставляют в струбцины от универсального штатива, привернутые к демонстрационному столу, и закрепляют. Освободив одну из струбцин, затягивают нижний конец экрана, а затем натягивают верхний конец экрана с помощью распорки.

Хорошее качество демонстрации получается при использовании непрозрачной ванны. В этом случае на дно ванны надо положить ткань из стекловолокна (можно использовать грубую мешковину). На ткань кладется зеркало, поверх которого наливается вода (рис. 87).

Ванна освещается точечным источником света, расположенным спереди ванны на высоте 50—60 см над демонстрационным столом. Передвигая осветитель, добиваются, чтобы на наклонном экране получалось изображение освещенного дна ванны с минимальными искажениями.

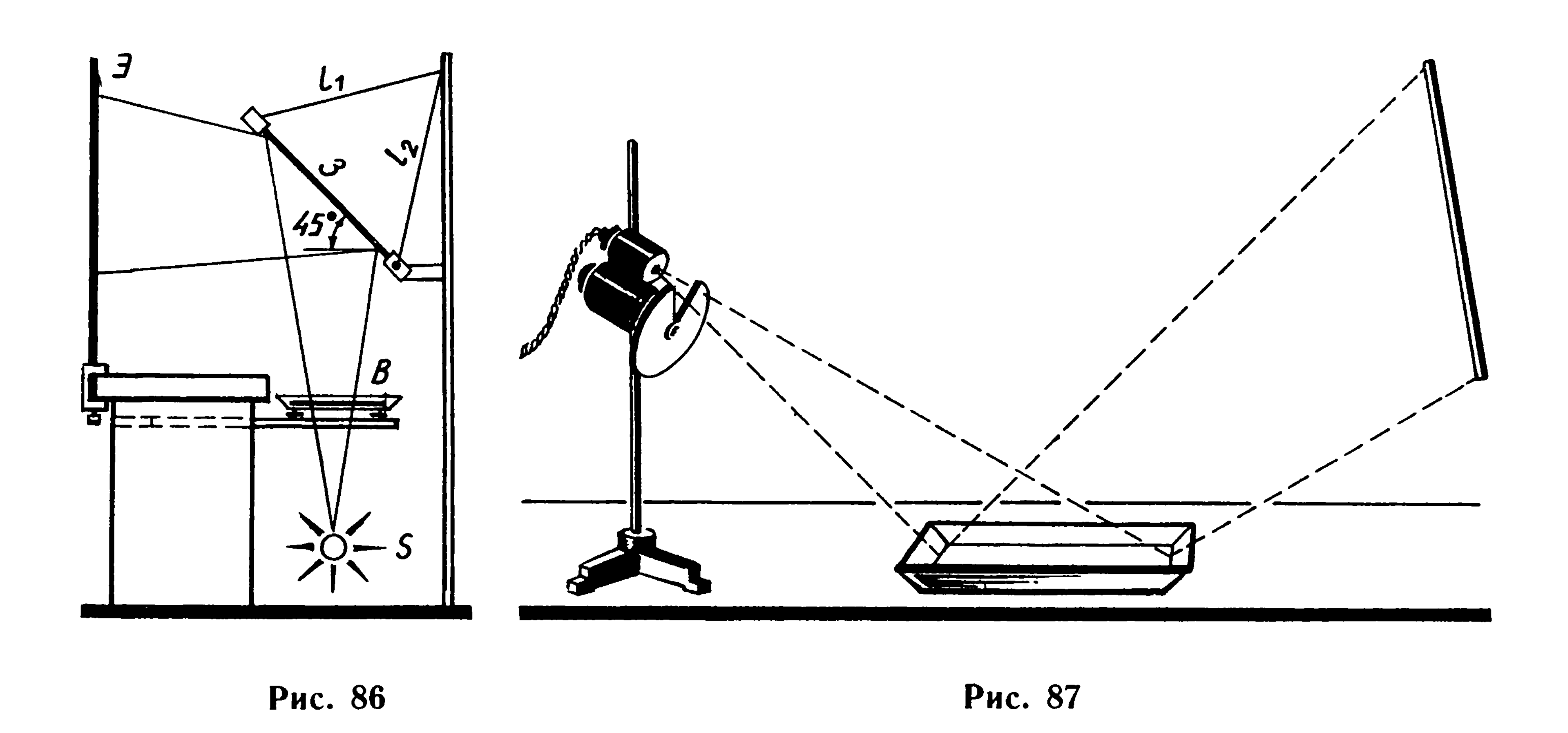


Рис. 86 Рис. 87

На уроке, посвященном изучению свойств волн, объясняют схему установки и, включив источник света, возбуждают карандашом одиночный цуг волн. Затем включают вибратор и наблюдают картину бегущих волн.

Проведенные наблюдения позволяют ввести понятие о фронте волны, луча и о фазовой скорости волны, которую определяют как скорость перемещения фазы в направлении, перпендикулярном фронту волны.

Опыт 96. Электромагнитные волны

Первоначальные представления об электромагнитных волнах лучше всего ввести аналитически, рассматривая процессы, происходящие в длинной линии, присоединенной к генератору УКВ.

После аналитического рассмотрения процессов, происходящих в линиях, следует продемонстрировать фрагменты из кинофильма, в котором с помощью мультипликации объясняется этот материал.

В заключение надо показать опыт, иллюстрирующий излучение электромагнитных волн. Для этого к генератору дециметровых волн присоединяется антенна (рис. 88, *а*). Включив генератор, наблюдают свечение лампочки, включенной в приемный диполь. Опыт хорошо идет, когда приемный диполь находится на расстоянии около 1 м от антенны.

Опыт свидетельствует и о том, что генератор излучает электромагнитные волны, и о том, что электромагнитные волны переносят энергию от генератора к приемнику. Однако о волновом характере электромагнитного поля можно пока судить лишь на основании выводов, полученных теоретически.

§ 11. Основные свойства волн

При постановке опытов, в которых демонстрируются основные свойства волн, следует иметь в виду, что для обнаружения звуко-

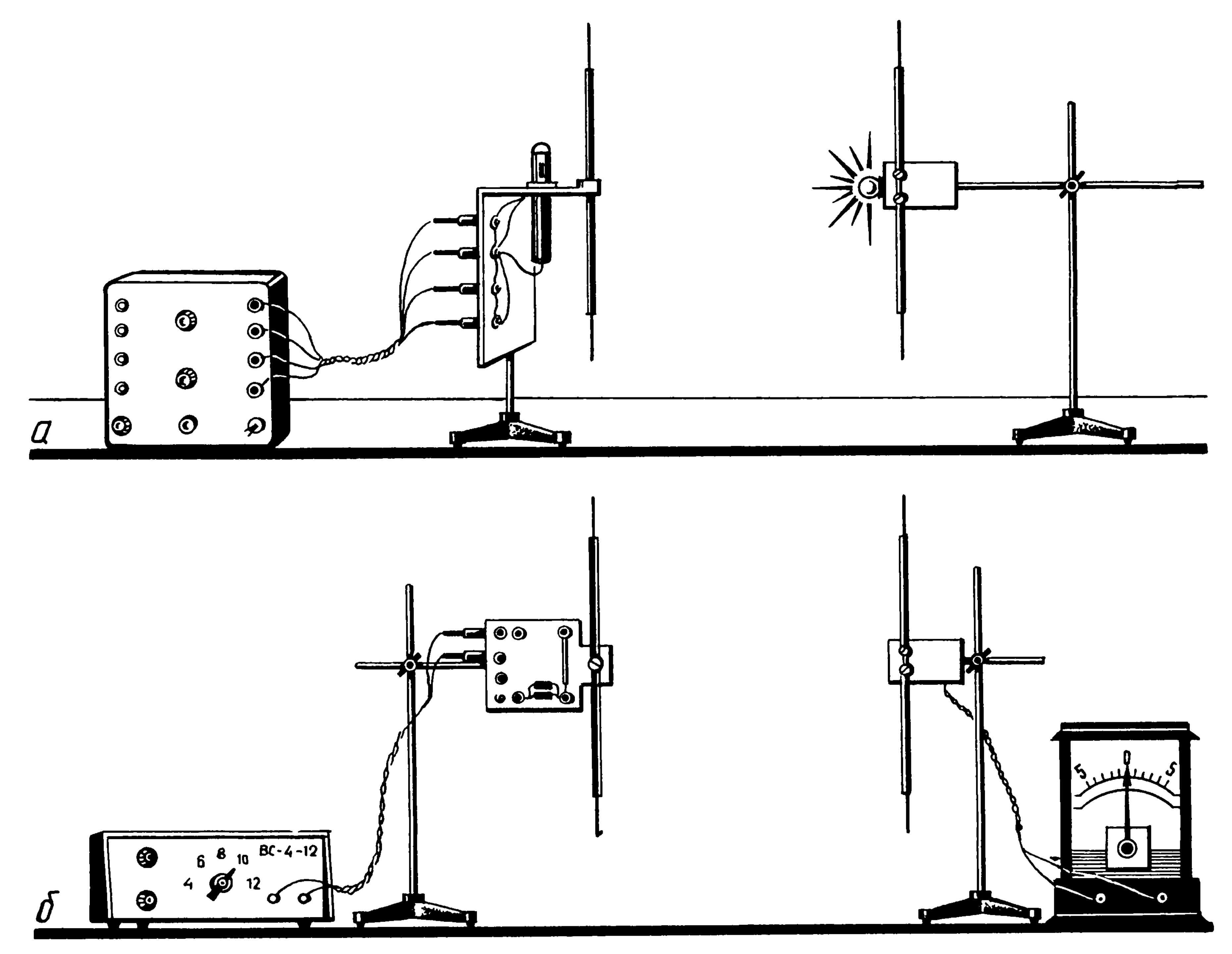


Рис. 88

вых волн используется микрофон, соединенный либо с усилителем, на выход которого присоединен демонстрационный вольтметр, либо непосредственно с электронным осциллографом. Наши наблюдения показывают, что с методической точки зрения оба способа индикации равноценны. Ниже при описании опытов указывается на использование электронного осциллографа.

При проведении опытов с генератором сантиметровых волн можно в качестве индикатора использовать демонстрационный вольтметр, громкоговоритель или электронный осциллограф. Но учащиеся лучше воспринимают эти опыты, если применять звуковую индикацию.

Для наблюдаемых при интерференции и дифракции света картин характерна малая интенсивность и освещенность, что затрудняет наблюдение этих явлений в ходе демонстрационных опытов. Для определения вызванных этим трудностей необходимо:

а) использовать по возможности более мощные источники света;

б) хорошо затемнять аудиторию физического кабинета;

в) не стремиться получить большие интерференционные картины, памятуя, что чем больше размеры интерференционной картины, тем меньше ее освещенность и четкость;

г) использовать не отражающий, а светопропускающий экран из тонкой матово-белой пленки (или кальки), натянутой на каркас;

д) тщательно подбирать оптимальные расстояния между приборами установок.

В качестве источника монохроматического света лучше использовать газовый лазер (например, ЛТ-56, ЛТ-75 и др.), а в качестве немонохроматического света — бытовой проекционный аппарат «Свитязь», в котором установлена металлогалогенная лампа мощностью 350 Вт.

Во всех описанных в этом параграфе опытах фигурирует ламповый генератор дециметровых волн. Однако все опыты можно поставить и с генератором, собранным на транзисторе, но в этом случае в опыте 180 надо в качестве приставки к приемному диполю использовать полупроводниковый усилитель.

Опыты 97—100. Энергия волн

Для последующего изучения свойств волн чрезвычайно важно на опытах убедить учащихся, что волны переносят энергию от источника колебаний к приемникам. Для этого надо повторить (слегка изменив) опыты 95—96. В процессе демонстрации опытов необходимо обратить внимание на энергетическую сторону явлений, а именно на то, что в источнике волн происходит преобразование подводимой к нему энергии в энергию колебаний, которая через вибратор в случае механических колебаний и через антенну в случае электромагнитных колебаний преобразуется в энергию волн. В приемниках энергия волн преобразуется в другие виды.

1. В волновую ванну, размещенную на демонстрационном столе, наливают воду так, чтобы толщина слоя воды была 3—4 см. В воду опускают кусочек пенопласта с укрепленным на нем флажком (рис. 89). При включении вибратора наблюдают колебания флажка. Опыт свидетельствует о переносе волнами энергии от вибратора к поплавку.

2. Собирают установку, изображенную на рисунке 88. Включив генератор, наблюдают свечение лампочки, включенной в середину приемной антенны. Опыт свидетельствует о переносе электромагнитными волнами энергии от генератора к приемнику.

3. Собирают установку, изображенную на рисунке 90. Включив

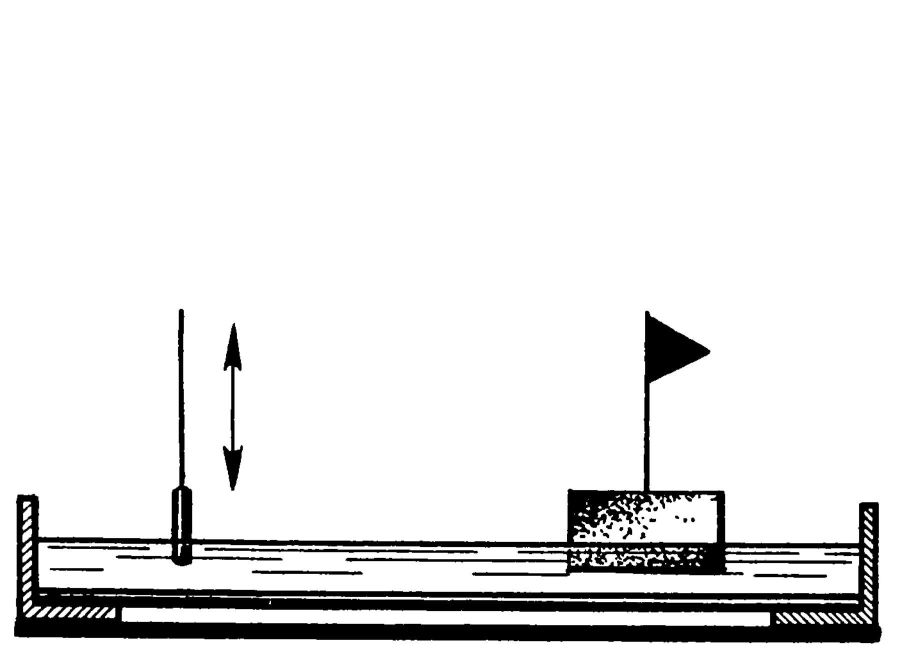


Рис. 89



Рис. 90

лампу, наблюдают изменение уровней столбиков жидкости жидкостного манометра, соединенного с теплоприемником. Опыт свидетельствует, что свет также переносит энергию от источника к приемнику. Вместо жидкостного манометра в опыте можно использовать микроманометр демонстрационный.

4. Собирают установку, изображенную на рисунке 91, и убеждаются, что звуковые волны переносят энергию от громкоговорителя к микрофону. В установке может быть использован любой микрофон.

Опыты 101—103. Давление волн

1. Для демонстрации давления волн необходим индикатор давления. Индикатором давления звуковых волн может служить весьма простой прибор, изображенный на рисунке 92. К легкой, но достаточно длинной деревянной планке, установленной с помощью стеклянного подшипника на острие иглы (можно взять подшипник от магнитной стрелки), подвешены лист бумаги и противовес P (например, шарик от электроскопа).

Индикатор давления располагают на расстоянии 5—10 см перед громкоговорителем, подключенным к звуковому генератору. Включив генератор, наблюдают движение листа бумаги от громкоговорителя. Частоту и амплитуду напряжения звукового генератора надо подобрать до урока.

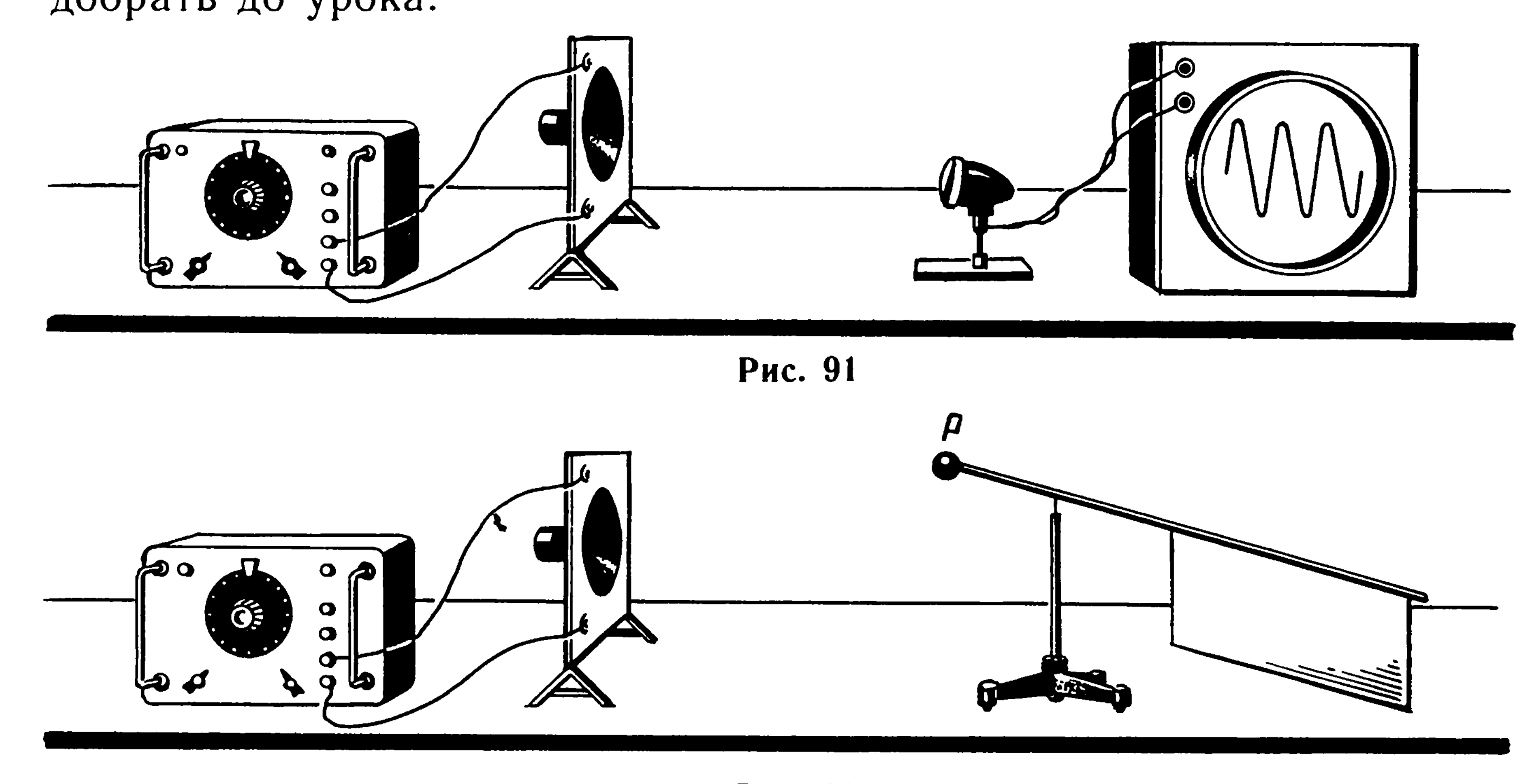
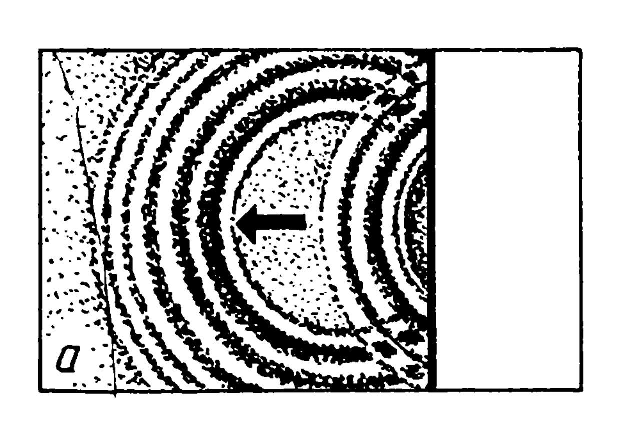


Рис. 91

Рис. 92

Рис. 93



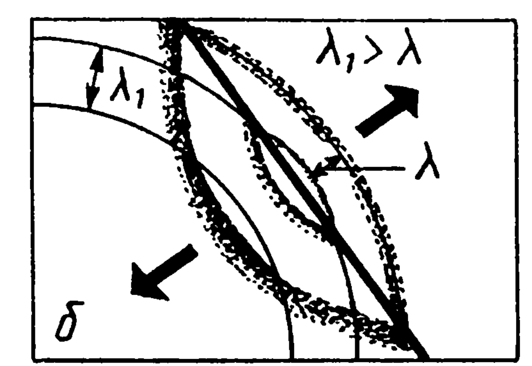


Рис. 94

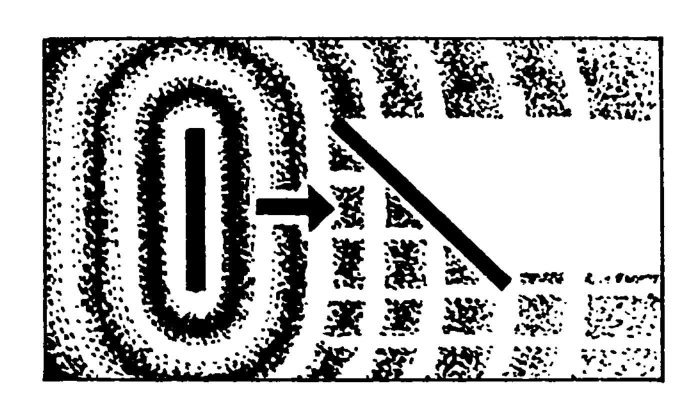


Рис. 95

2. В волновую ванну опускают широкий нижний конец легкой деревянной стрелки (рис. 93). Включив вибратор, наблюдают, что верхний конец стрелки наклоняется влево. Опыт свидетельствует о давлении волн на нижний конец стрелки.

3. Полезно показать учащимся учебный кинофильм «Давление света». В фильме иллюстрируется гипотеза Кеплера о влиянии светового давления на образование хвостов комет, напоминаются взгляды Ньютона и Гюйгенса на природу света, рассказывается о работах Максвелла. Большая часть фильма посвящена показу экспериментальной установки и методике эксперимента, проведенного русским физиком П. Н. Лебедевым, в ходе которого было впервые измерено давление света.

Опыты 104—106. Отражение волн

1. Собирают установку с волновой ванной. Поместив в ванну непрозрачное для волн препятствие, например деревянный брусок, возбуждают одиночный цуг волн. Наблюдают, что волны, дойдя до препятствия, отражаются (рис. 94, *а*).

Помещают на дно ванны толстое, желательно слегка окрашенное стекло, размеры которого равны примерно половине прозрачной части ванны. Возбудив одиночный цуг волн, наблюдают, что на границе между глубокой и мелкой частями ванны волны частично проходят, а частично отражаются (рис. 94, *б*).

Вынимают из ванны стекло и вновь ставят препятствие. Возбудив с помощью вибратора плоские волны, наблюдают их отражение (рис. 95). Меняя угол падения волн, наблюдают и изменение угла отражения. Схемы проведенных опытов зарисовывают на доске.

2. Собирают установку, изображенную на рисунке 96. Включив звуковой генератор, устанавливают частоту примерно 3—6 кГц. С помощью микрофона, соединенного через усилитель с вольтметром, показывают, что громкоговоритель дает сравнительно узкий пучок волн. На пути волн ставят экран из фанеры и с помощью микрофона обнаруживают отражение волн. Меняя угол падения, замечают, что меняется и угол отражения.

3. Собирают установку, изображенную на рисунке 97, *а*. Включив выпрямитель и усилитель, демонстрируют работу генератора и приемника СВЧ.

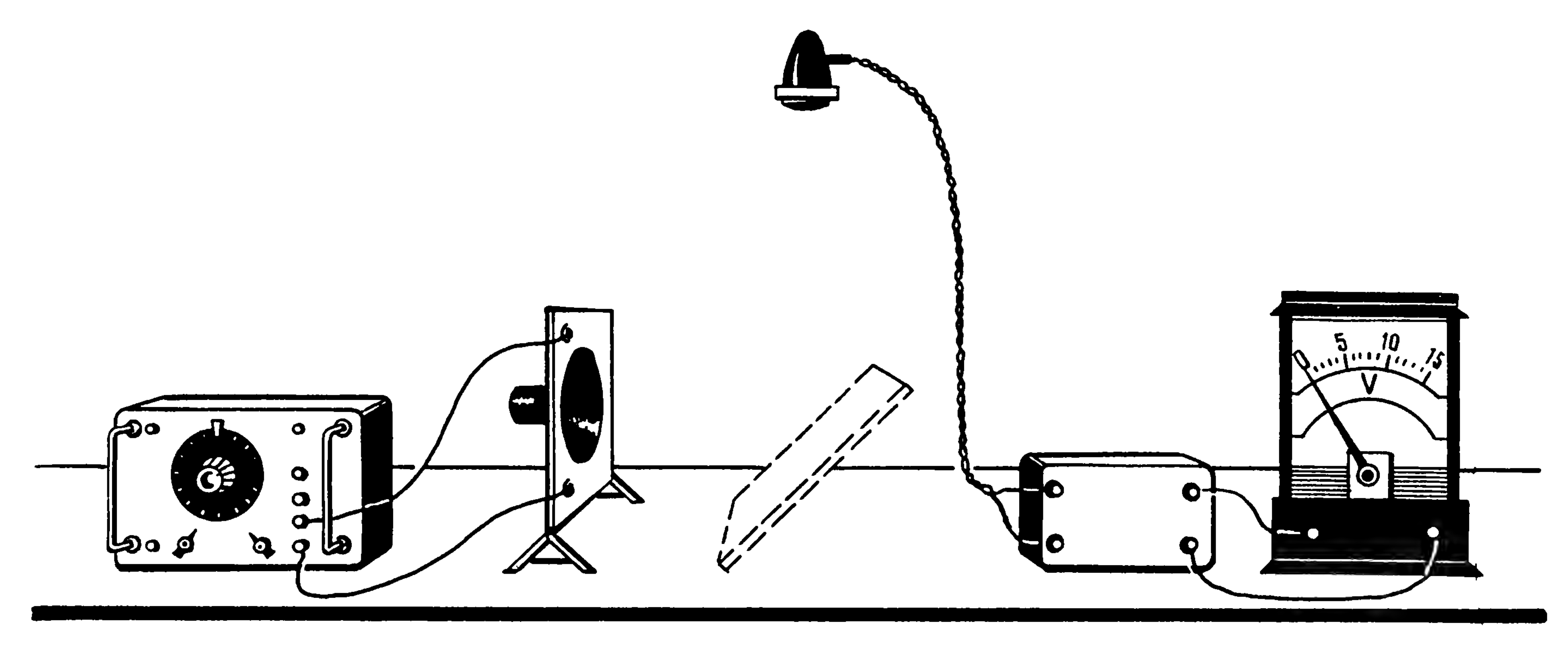


Рис. 96

Изменяют положение излучающей антенны и замечают, что прием электромагнитных волн прекращается. Затем изменяют аналогичным образом положение приемной антенны и убеждаются, что приема попрежнему нет. В точку пересечения осей передающей и приемной антенн вносят плоский лист алюминия так, как это показано на рисунке 97, *б*. Обнаруживают отчетливый прием отраженных волн. Меняют угол падения волн и замечают, что при этом меняется и угол отражения.

Рис. 97

Повторяют опыт с пластиной из диэлектрика и обнаруживают, что в этом случае волны также отражаются, но менее интенсивно.

Опыты 104—106 дают основание сделать вывод, что отражение волн от препятствий является общим свойством волн, не зависящим от их природы.

Показав отражение волн, надо объяснить учащимся, почему волны отражаются. Сделать это можно проще всего, подойдя к явлению с энергетических позиций.

Учащиеся уже знают, что бегущая волна обладает энергией. Встретив неподвижное массивное препятствие, волна не может передать ему своей энергии и в результате испытывает отражение. Отраженная волна и уносит энергию падающей волны.

Такое объяснение не является исчерпывающим, но его достоинства очевидны: оно доступно для учащихся, так как опирается на известный им закон сохранения и превращения энергии. При дальнейшем изучении волновых явлений это первоначальное объяснение будет расширяться.

Опыты 107—109. Законы отражения волн

Законы отражения волн выводятся теоретически с помощью принципа Гюйгенса. Однако справедливость полученного вывода надо показать на опыте, и притом желательно и для волн на поверхности воды, звуковых, электромагнитных, и для... световых пучков. На этой стадии изучения свойств волн, по-видимому, еще не следует использовать термин «световые волны», так как волновой характер света пока для учащихся неочевиден из-за недостатка фактов. Учащиеся пока знают лишь, что скорость распространения света равна скорости электромагнитных волн, и то, что есть эксперименты, показывающие связь электромагнитных и световых явлений. Задача учителя заключается в постепенном увеличении числа подобных фактов в представлениях учащихся для того, чтобы вся их совокупность убедила учащихся в том, что свет — электромагнитные волны.

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 98. Громко-

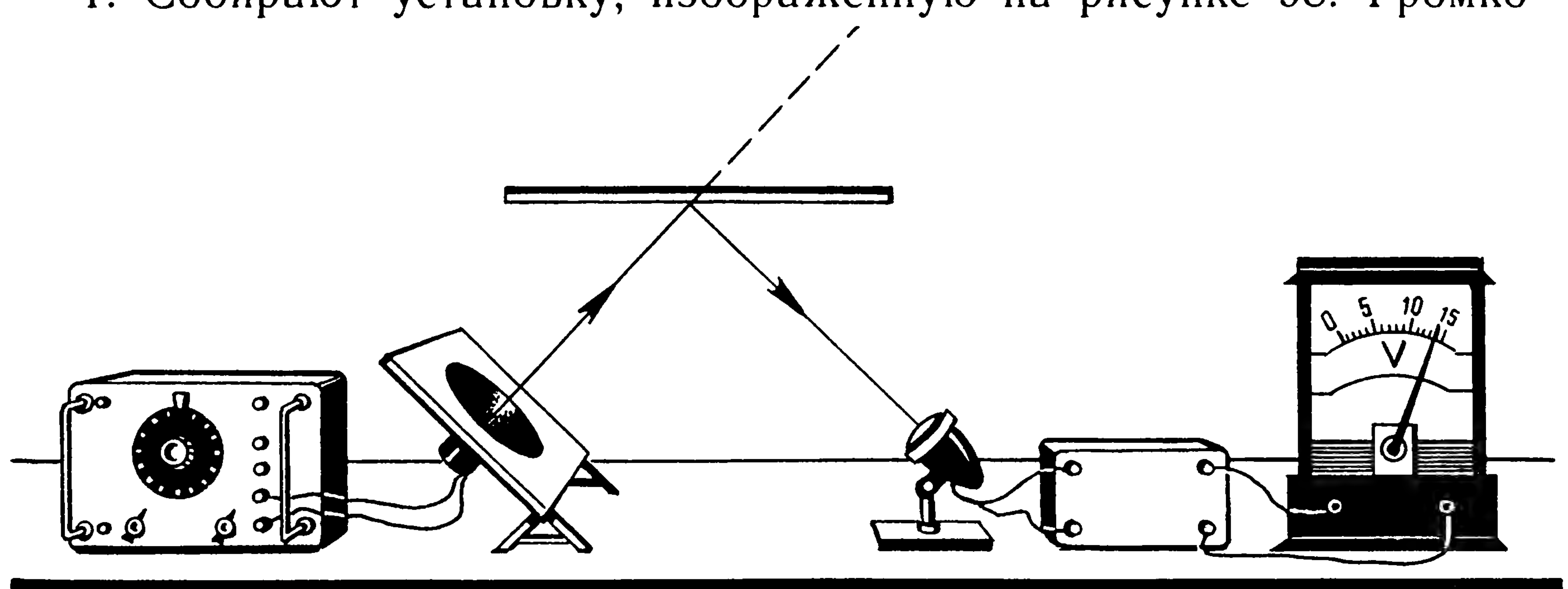


Рис. 98

говоритель следует подключить к выходу «5 Ом» звукового генератора, а микрофон — к входу «Микрофон» усилителя звуковой частоты, а выход усилителя — к демонстрационному вольтметру через дополнительный резистор «15 В». Включив звуковой генератор, установленный на частоте 5—6 кГц, и усилитель, наблюдают, что стрелка вольтметра стоит на нуле, а значит, звуковые волны, излучаемые громкоговорителем, не воспринимаются микрофоном.

В место предполагаемого пересечения осей громкоговорителя и микрофона вносят зеркало из набора деталей к генератору сантиметровых волн. Стрелка вольтметра заметно отклоняется. Измеряют углы падения и отражения. Поворачивают зеркало и наблюдают, что стрелка вольтметра не отклоняется. Аналогичная картина получается и при изменении плоскости зеркала (для этого ближний край зеркала наклоняют в сторону класса).

2. Собирают установку, изображенную на рисунке 97. Она аналогична предыдущей, но вместо источника и приемника механических волн используются генератор и приемник электромагнитных волн сантиметрового диапазона. Опыт проводится в той же последовательности, что и описанный выше. Результаты опыта аналогичные.

3. Собирают установку, изображенную на рисунке 99. Подключив осветитель оптического диска к источнику тока напряжением 5 В, показывают, что световой пучок, исходящий из осветителя, при любом положении последнего проходит через центр диска. Устанавливают на диске параллельно демонстрационному столу плоское зеркало и демонстрируют, что при любом положении осветителя угол отражения равен углу падения. Подставив под дальний от учащихся край зеркала подкладку, изменяют плоскость зеркала. Замечают, что отраженный луч проходит мимо плоскости диска.

Опыты 110—113. Два случая отражения волн

Процесс отражения волн быстротечен, и его практически невозможно рассмотреть при непосредственном наблюдении. Однако этот процесс хорошо запечатлен в кинофрагменте, который снимался с большой частотой, а демонстрируется с нормальной частотой; поэтому процесс отражения как бы растянут во времени. В первом эпизоде первой части фрагмента показано, как вдоль шнура, прикрепленного к крюку в стене, бежит волна: дойдя до крюка, волна отражается с потерей полуволны. Опыт повторяется три раза.

Вторая часть кинофрагмента посвящена отражению волны от тонкой лески, привязанной к крюку. Видно, что отражение происходит без потери полуволны.

Увиденное в кинофильме явление надо повторить в ходе демонстрации описанных ниже опытов. Опыты идут весьма успешно, если использовать стробоскопическое освещение, а шнур взять от спортивной скакалки. Шнур надо прикрепить к крюку, укрепленному на потолке аудитории над демонстрационным столом. Если такого крюка нет и его нельзя сделать, опыт (с меньшей вырази-

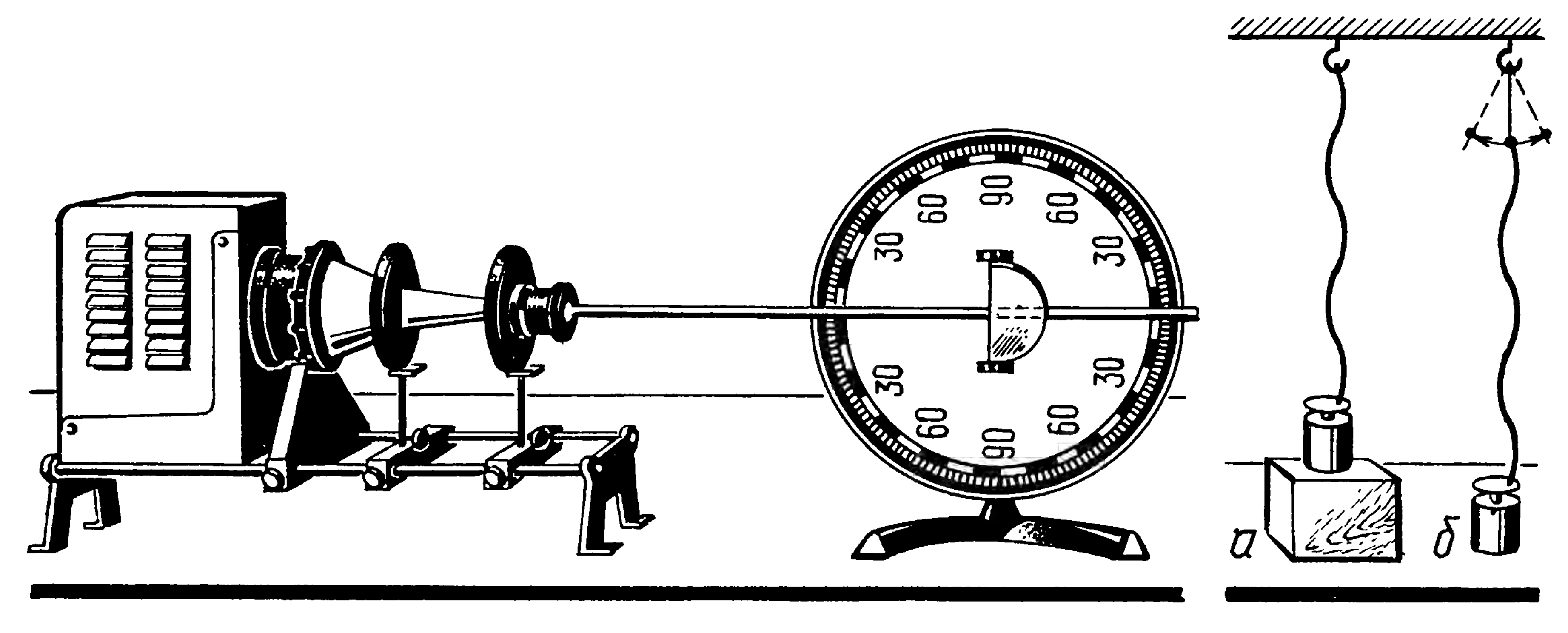


Рис. 99 Рис. 100

тельностью) можно поставить, используя демонстрационный штатив двойной высоты. Верхний конец резинового стержня образует небольшую петлю (которая надевается на крюк), а к ней прикреплена прочная леска (тоже с петлей на конце). Перед уроком леска и стержень надеваются на крюк, а нижний конец стержня закрепляется на эксцентрике универсального двигателя. Универсальный двигатель в начале опыта должен стоять на подставке, высота которой равна длине лески. Опыты ставятся в следующей последовательности:

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 100, *а*. Включив вибратор и стробоскоп, выключают свет в предварительно затемненной аудитории. Меняя частоту импульсов стробоскопа (частоту вращения двигателя надо подобрать до урока), добиваются наиболее устойчивой картины движения волн и убеждаются, что отражение происходит с потерей полуволны.

2. Выключив установку, снимают петлю шнура с крюка (рис. 100, *б*) и повторяют опыт. Наблюдают, что отражение происходит без потери полуволны.

3. Замкнутую накоротко длинную линию индуктивно связывают с генератором дециметровых волн (рис. 101, *а*). Используя неоно-

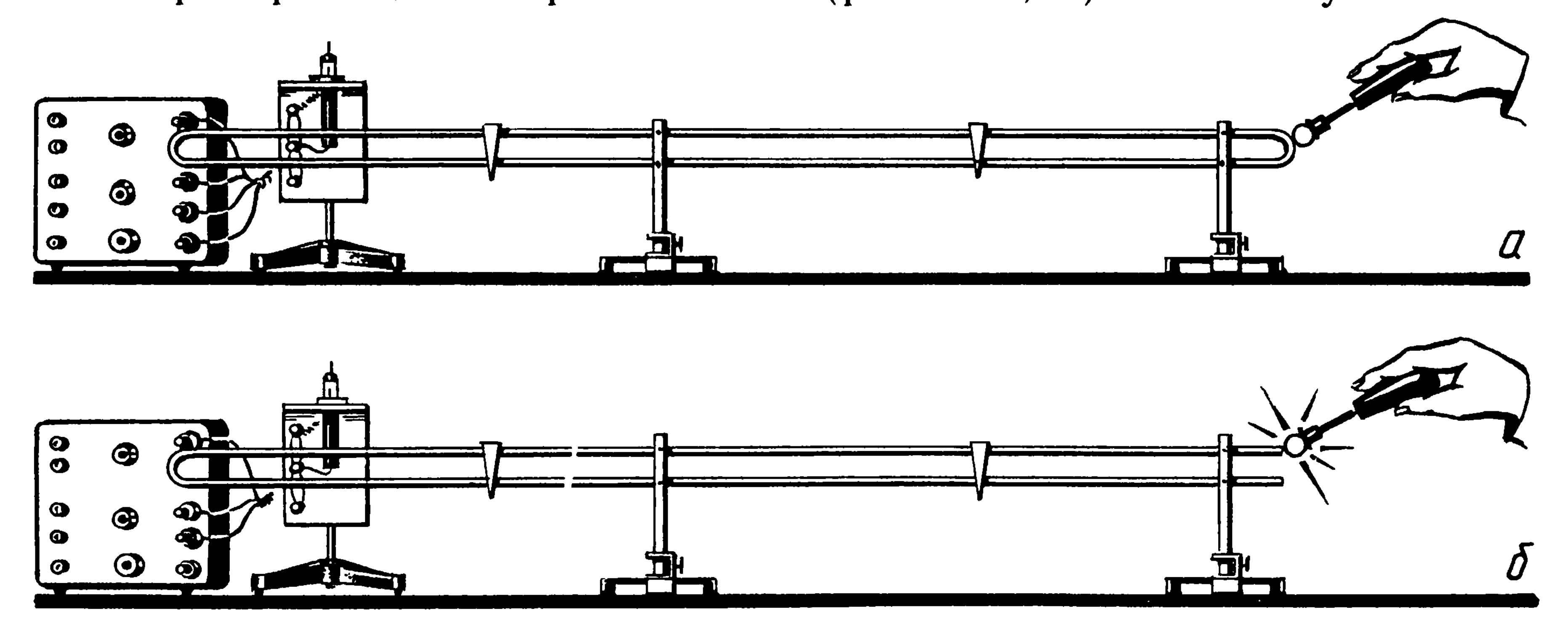


Рис. 101

вую лампочку как индикатор напряжения, убеждаются, что на конце линии лампочка не светится. Это означает, что отражение электромагнитной волны происходит с потерей полуволны и напряжение на конце линии равно нулю.

4. Размыкают длинную линию (рис. 101, *б*) и убеждаются, что отражение происходит без потери полуволны: лампочка ярко светится.

Опыты 114—115. Скорость волн в различных средах

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 86. На дно ванны помещают толстый лист цветного стекла так, чтобы он занял половину дна ванны. Наливают воду и, включив осветитель и вибратор, замечают, что длина волны там больше, где глубина (толщина слоя жидкости) больше (рис. 102).

Анализируя результаты опыта, напоминают связь между длиной волны, скоростью распространения и периодом колебаний ($\lambda = vt$) и приходят к выводу, что фазовая скорость поверхностных волн в волновой ванне зависит от глубины слоя жидкости: чем больше глубина слоя жидкости, тем фазовая скорость больше.

Подчеркивают, что различие в скорости распространения волн при разной толщине слоя жидкости волновой ванны позволяет рассматривать эти две части ванны как модель двух сред.

2. Зависимость фазовой скорости от свойств среды можно показать и для электромагнитных волн. Для этого напоминают, что длина антенны для приема электромагнитных волн должна быть равна половине длины волны.

Включив генератор УКВ, располагают около его антенны диполь, длина которого равна $^1/_{18}$ длины волны, и значительно дальше — диполь, длина которого равна $^1/_2$ длины волны генератора. В то время как лампочка, включенная в более дальний диполь, ярко светится, лампочка, включенная в ближний диполь, не светится.

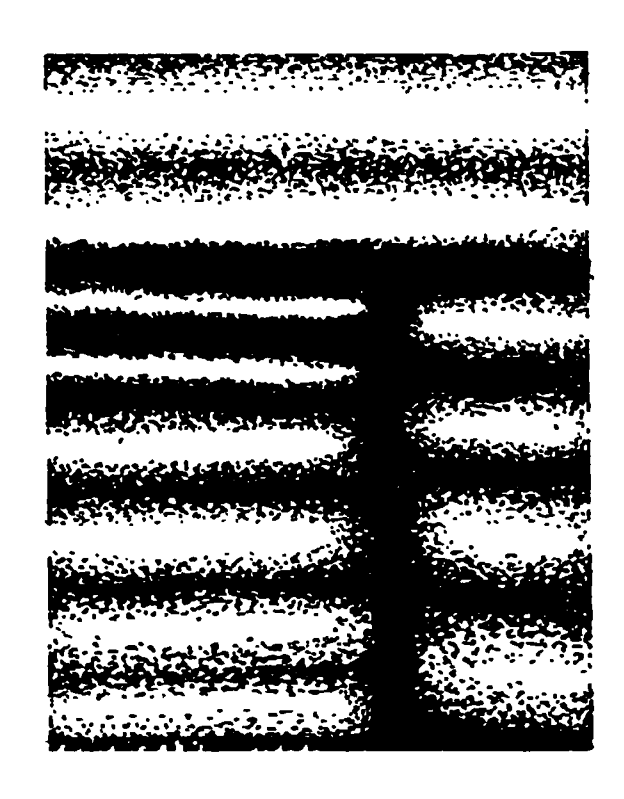


Рис. 102

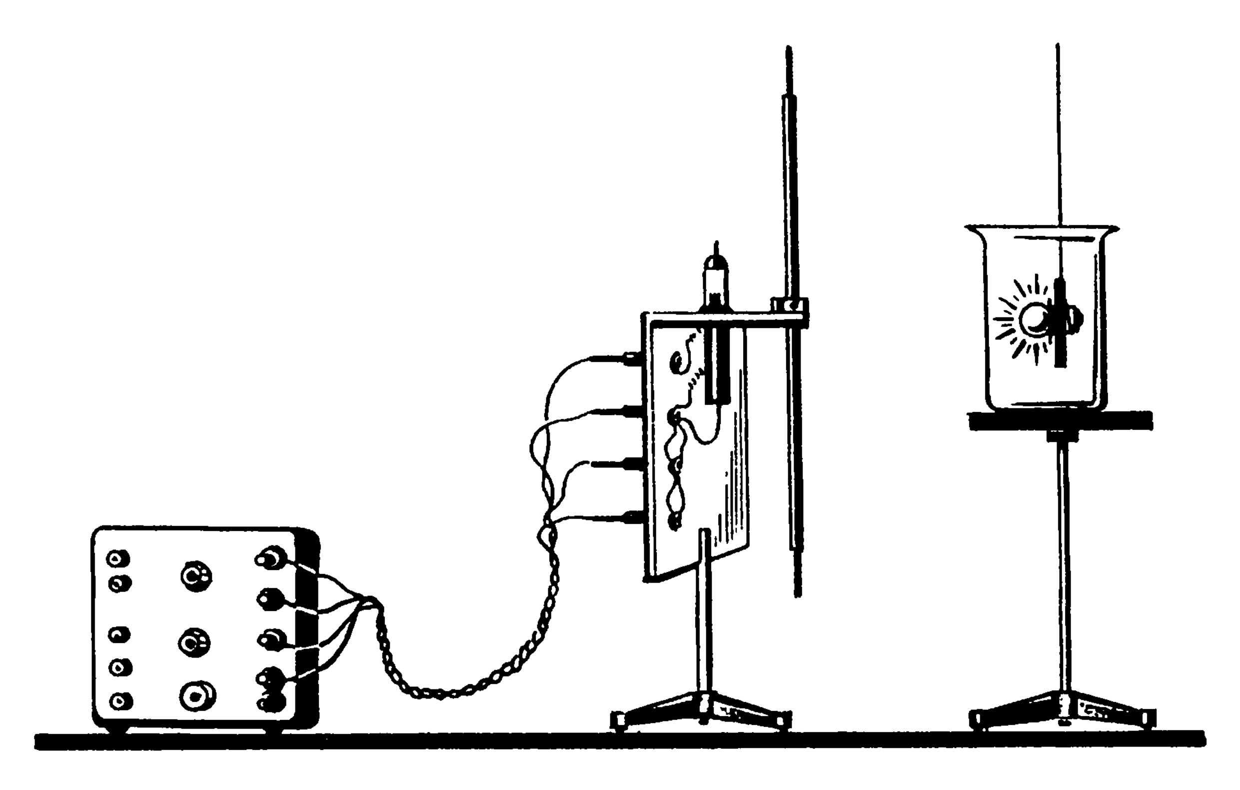


Рис. 103

Опустив короткий диполь в цилиндр с дистиллированной водой, наблюдают яркое свечение включенной в него лампочки (рис. 103).

Опыт говорит о том, что длина электромагнитных волн в воде в 9 раз меньше, чем в воздухе, а это свидетельствует о том, что во столько же раз их скорость в воде меньше скорости в воздухе.

Опыты 116—117. Преломление волн

1. На дно волновой ванны помещают толстое цветное стекло и устанавливают вибратор с плоской насадкой так, как это показано на рисунке 86. Включив осветитель и вибратор, наблюдают отражение и преломление волн на границе между мелкой и глубокой зонами ванны (рис. 104). Следует иметь в виду, что при одних частотах очень хорошо видны отраженные волны, а хуже преломленные и, наоборот, при других частотах хорошо видны преломленные волны и хуже — отраженные. Изменяя частоту колебаний вибратора, добиваются наиболее выразительной картины явления.

Меняя положение вибратора, изменяют угол падения волн и наблюдают изменение углов отражения и преломления.

2. Собирают установку, изображенную на рисунке 105, *а*. Включив генератор и усилитель, обнаруживают, что волны, излучаемые антенной генератора, не попадают в приемную антенну. Чтобы показать, что установка работает, опускают генератор до уровня приемной антенны. Затем вносят в пространство между приемной и передающей антеннами параллелепипед и наблюдают уверенный прием электромагнитных волн (рис. 105, *б*). На классной доске вычерчивают схему расположения приборов и ход лучей.

Проделанные опыты убеждают в том, что на границе двух сред одновременно с отражением происходит преломление волн и что преломление волн на границе двух сред есть общее свойство волн, не зависящее от их природы.

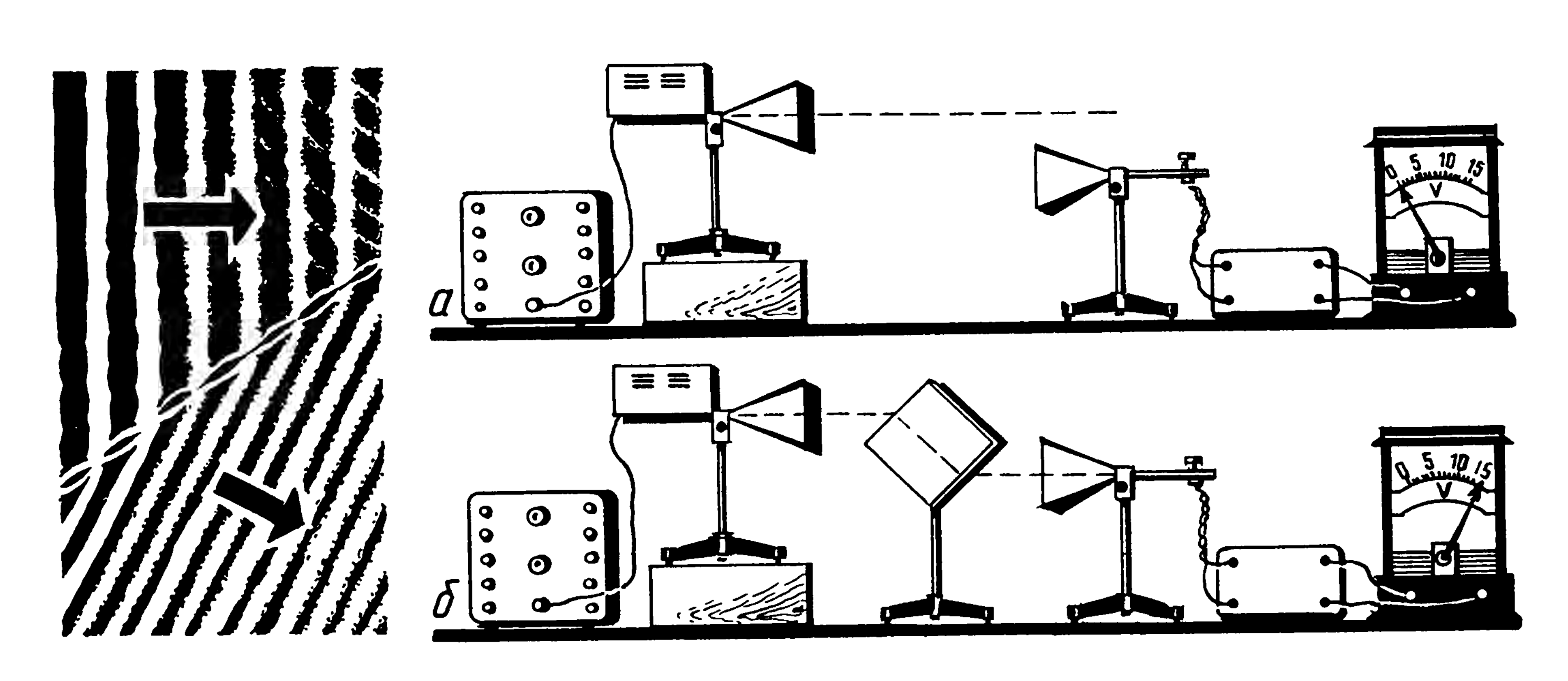


Рис. 104 Рис. 105

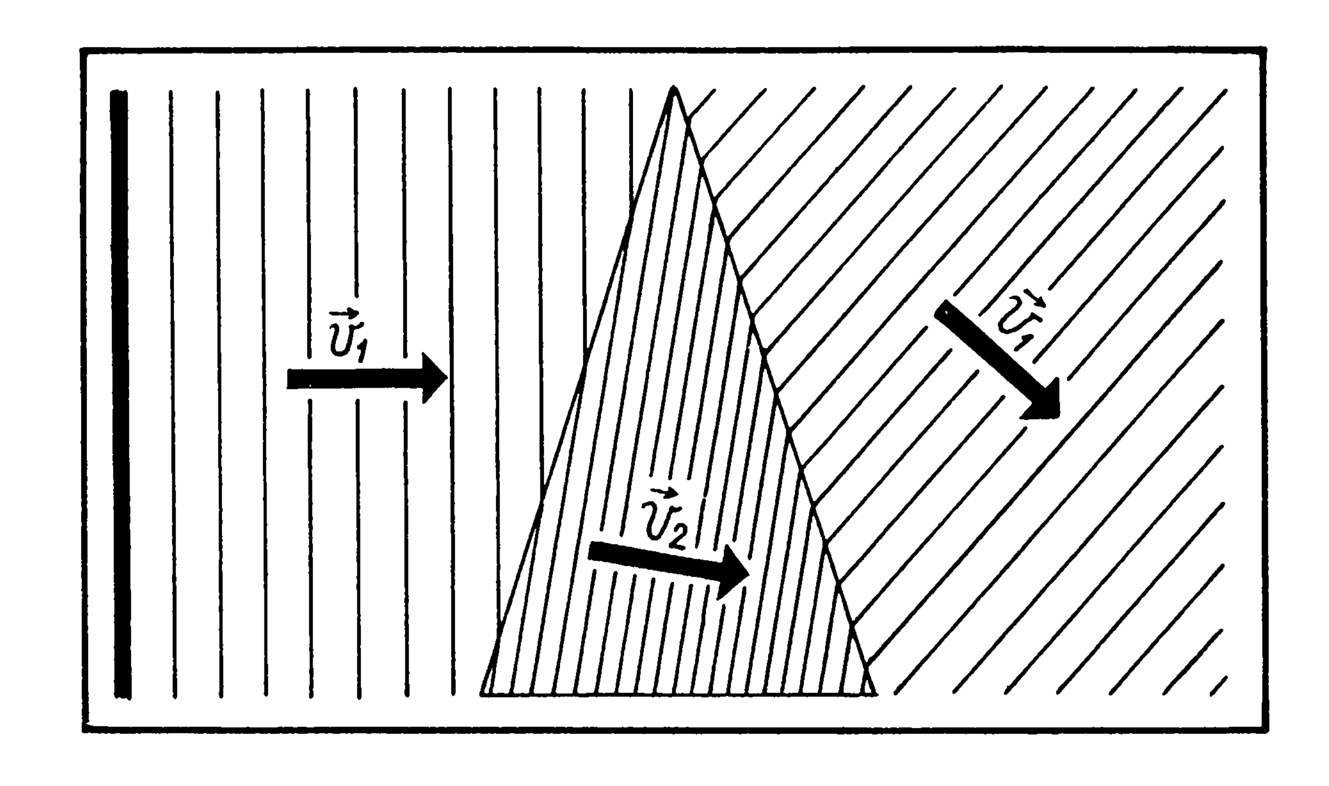


Рис. 106

Опыты 118—119. Прохождение волн через треугольную призму

1. Положив на дно волновой ванны треугольную призму, наливают в ванну воду (рис. 106). Надевают на вибратор плоскую насадку и устанавливают вибратор. Включив вибратор, наблюдают прохождение волн на малой глубине ванны, имеющей форму треугольной призмы. Изменяя частоту колебаний вибратора, добиваются выразительной картины на экране.

2. Собирают установку, показанную на рисунке 107, *а*. Включив генератор и усилитель, обнаруживают прием электромагнитных волн. Ставят между линзой и приемником треугольную призму (рис. 107, *б*) — прием прекращается. Опускают приемник и вновь обнаруживают прием электромагнитных волн (рис. 107, *в*).

На доске рисуют ход лучей через призму.

Перед генератором СВЧ помещают металлопластинчатую призму (ее описание дано в § 16). Учащимся сообщают, что показатель преломления материала этой призмы меньше единицы, и предлагают начертить ход волн через эту призму. Заслушав соображения учащихся, демонстрируют опыт и обнаруживают, что призма отклоняет электромагнитные волны не к основанию, а к вершине.

Опыты 120—122. Преломление света

Цель опыта — экспериментально исследовать явления, происходящие при падении света на границу раздела двух сред, сформулировать закон преломления света, выяснить распределение энергии падающего света и его зависимость от углов падения и преломления. В зависимости от наличия необходимого оборудования и приборов можно провести опыты как с использованием лазера, так и традиционных источников света.

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 108. Полуцилиндрическую линзу закрепляют на диске так, чтобы середина плоской поверхности совпала с центром диска. На небольшом рас-

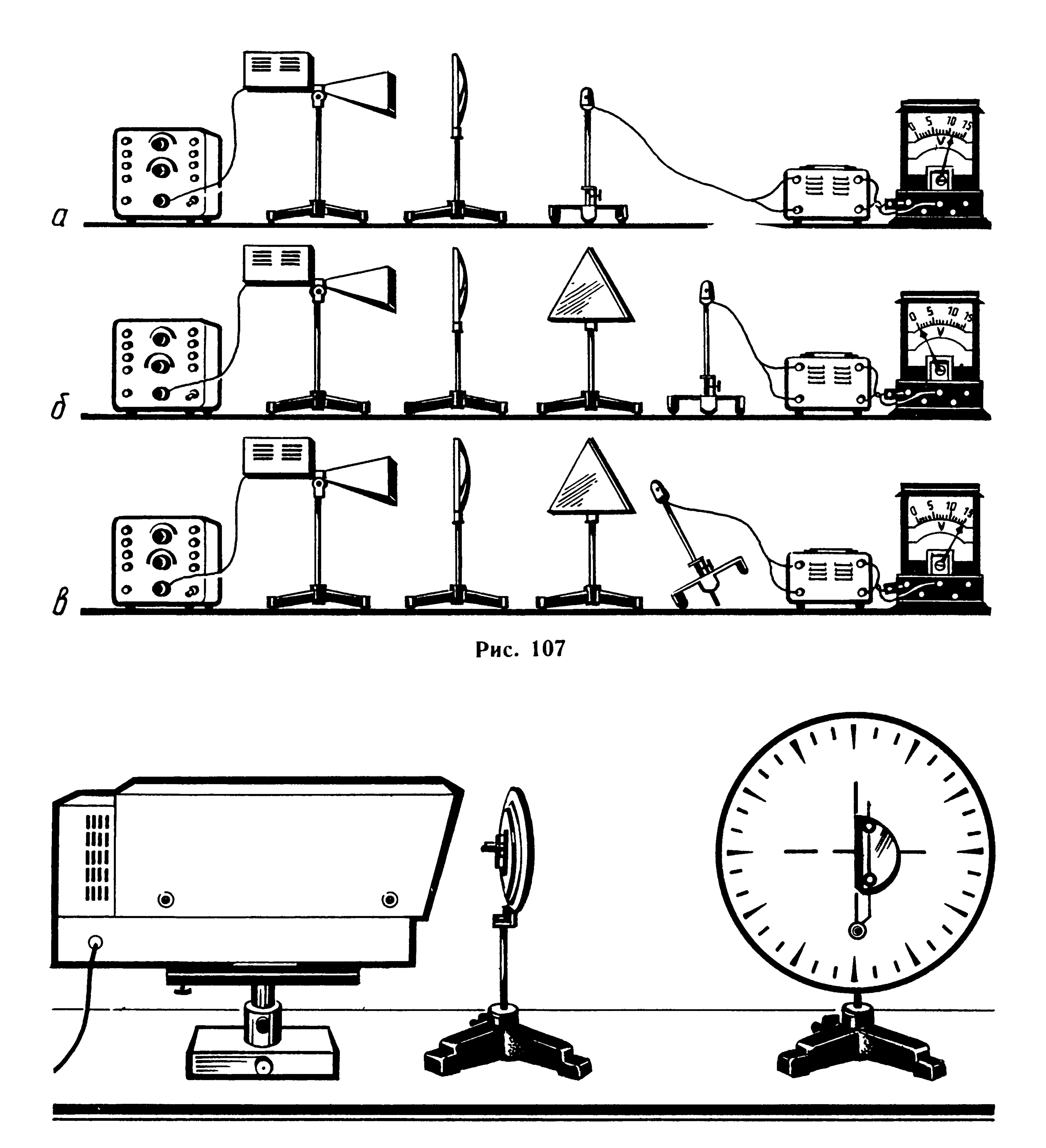


Рис. 107

Рис. 108

стоянии от дискового экрана располагают лазер. Для получения широкого и плоского пучка света на пути распространения света лазера непосредственно у щели помещают короткофокусную самодельную цилиндрическую линзу. Расширенный пучок света направляют вдоль диаметра дискового экрана перпендикулярно плоской грани линзы. В этом случае луч проходит ее, не изменяя первоначального направления (рис. 109, *а*). Изменяя положение экрана относительно луча лазера, добиваются четкой его видимости всеми учащимися. Затем, поворачивая линзу на некоторый угол, изменяют угол падения луча. При этом в точке падения луч лазера делится на

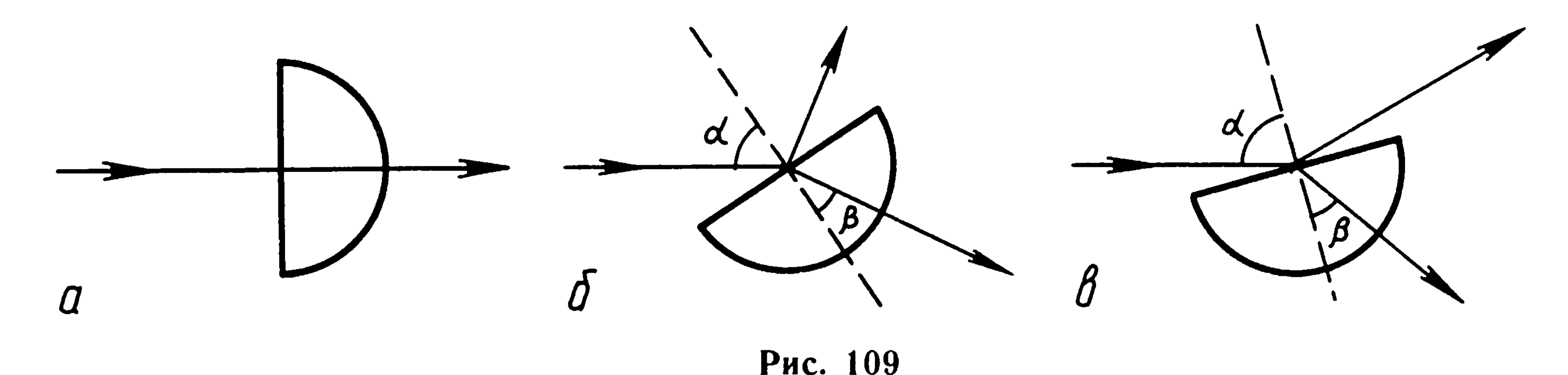


Рис. 109

два: один отражается от плоской грани линзы и идет в воздух под углом, равным углу падения; другой проходит в стекло под углом, меньшим, чем угол падения (рис. 109, *б*). При изменении угла падения соответственно изменяется и угол преломления, оставаясь меньше, чем угол падения (рис. 109, *в*).

Для демонстрации преломления света при переходе из оптически более плотной среды в менее плотную луч лазера направляют на выпуклую поверхность полуцилиндрической линзы (рис. 110, *а*). Как и в предыдущем опыте, на границе раздела выпуклая поверхность линзы — воздух направление луча лазера не меняется, так как преломленный луч идет по радиусу, который всегда перпендикулярен выпуклой поверхности. Если угол падения луча внутри полуцилиндра на границу раздела плоская поверхность линзы — воздух отличен от нуля, то при любых его значениях угол преломления больше, чем угол падения (рис. 110, *б*).

2. При отсутствии в кабинете физики лазера опыт проводят с помощью прибора для изучения законов геометрической оптики (рис. 111, *а*). Полуцилиндрическую линзу устанавливают на диско-

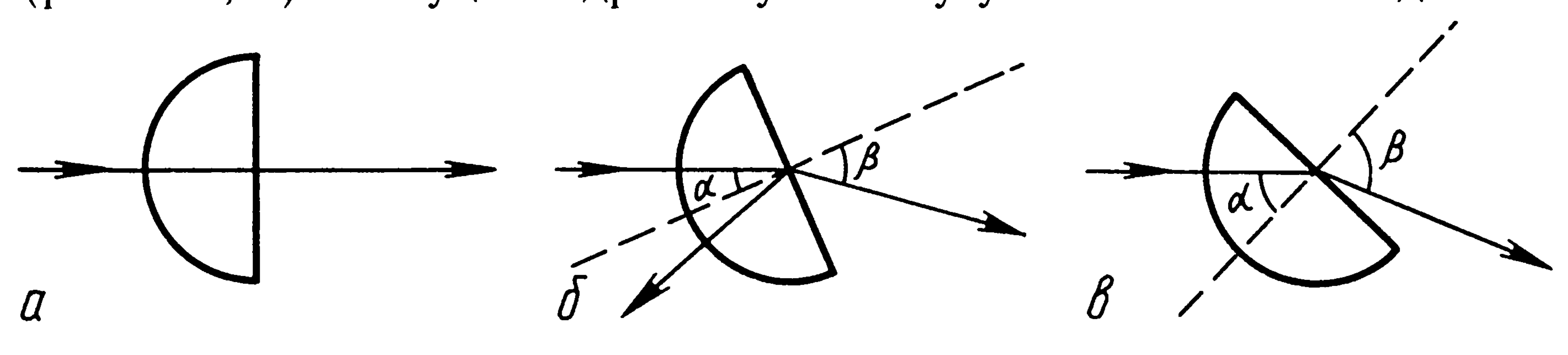


Рис. 110

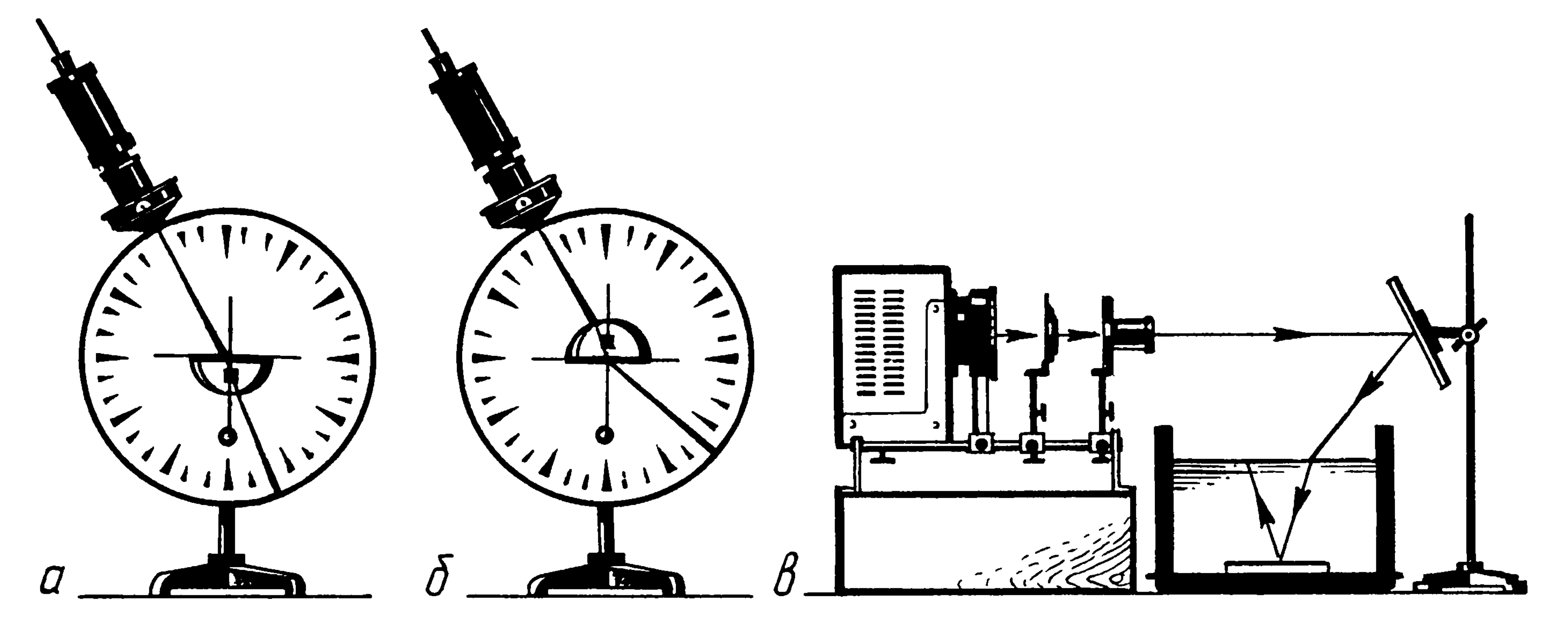


Рис. 111

вой экран так же, как и в предыдущем опыте. Источником света в данном случае является осветитель прибора. Для демонстрации преломления пользуются одним центральным лучом. Угол падения луча на плоскую поверхность полуцилиндра изменяют перемещением осветителя вокруг дискового экрана.

Для демонстрации преломления света при переходе из оптически более плотной среды в менее плотную луч света направляют на выпуклую поверхность линзы (рис. 111, *б*). При этом в силу перпендикулярности падения луч проходит полуцилиндрическую поверхность без преломления. Угол преломления на границе раздела плоская поверхность линзы — воздух зависит от угла падения.

Опыт 123. Преломление света в призме

Треугольная призма применяется во многих оптических приборах. Для понимания принципа работы некоторых из них необходимо показать учащимся ход лучей в треугольной призме.

Установка для демонстрации опыта изображена на рисунке 112. На дисковом экране укрепляют самодельную призму из оргстекла с преломляющим углом вверх. На одну из граней призмы направляют расширенный пучок света лазера. Пучок света лазера, испытав преломление на двух гранях призмы, выходит в воздух, отклонившись в сторону основания призмы. Угол отклонения отсчитывают приблизительно по делениям диска. Его можно оценить также, сравнивая направления выходящего из призмы луча и второго луча, который идет, минуя призму.

Затем на дисковом экране укрепляют трапециевидную призму острым углом вверх (рис. 113). На одну из ее граней направляют пучок света лазера. Изменяя угол падения луча поворотом призмы,

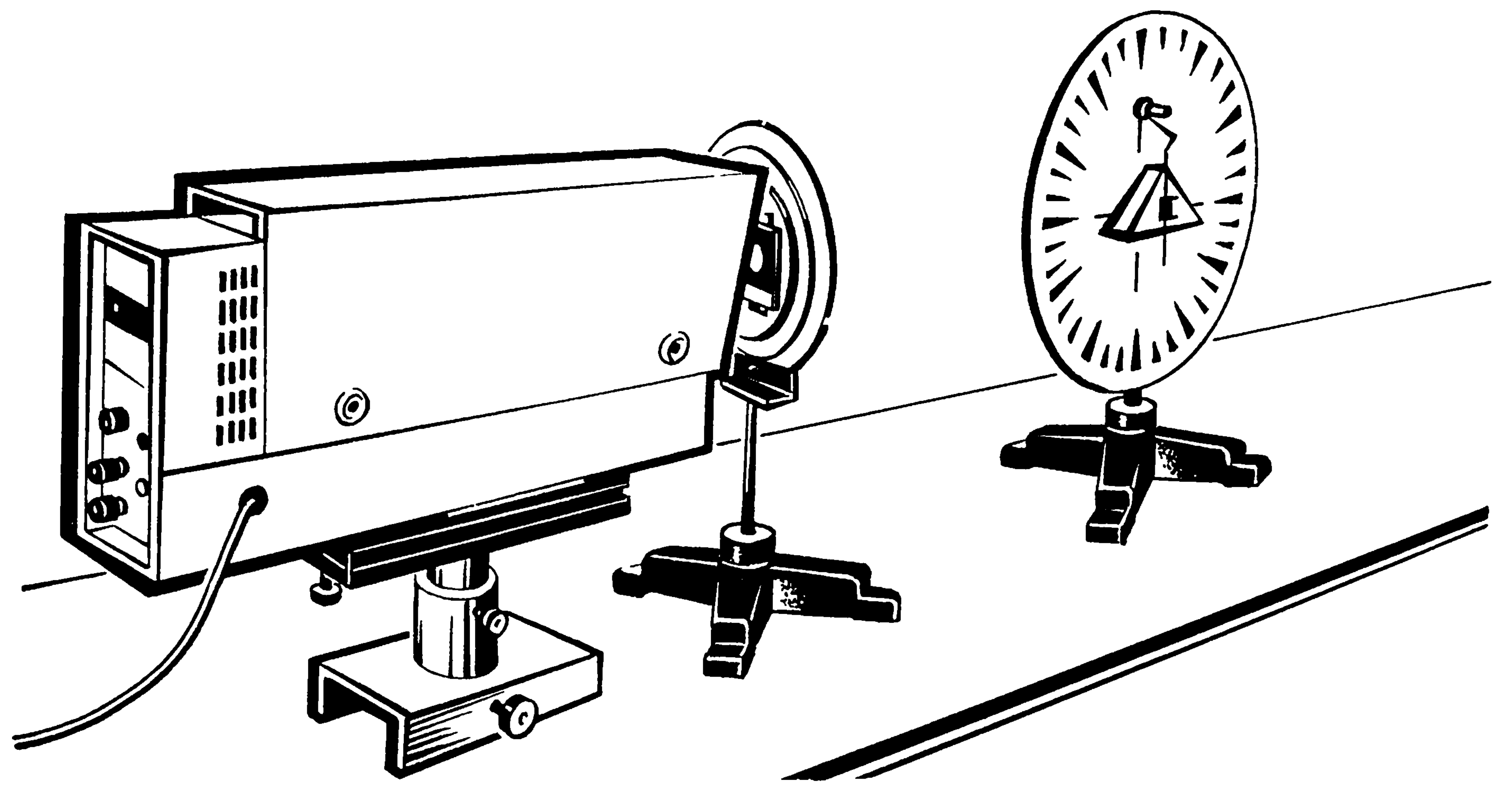


Рис. 112

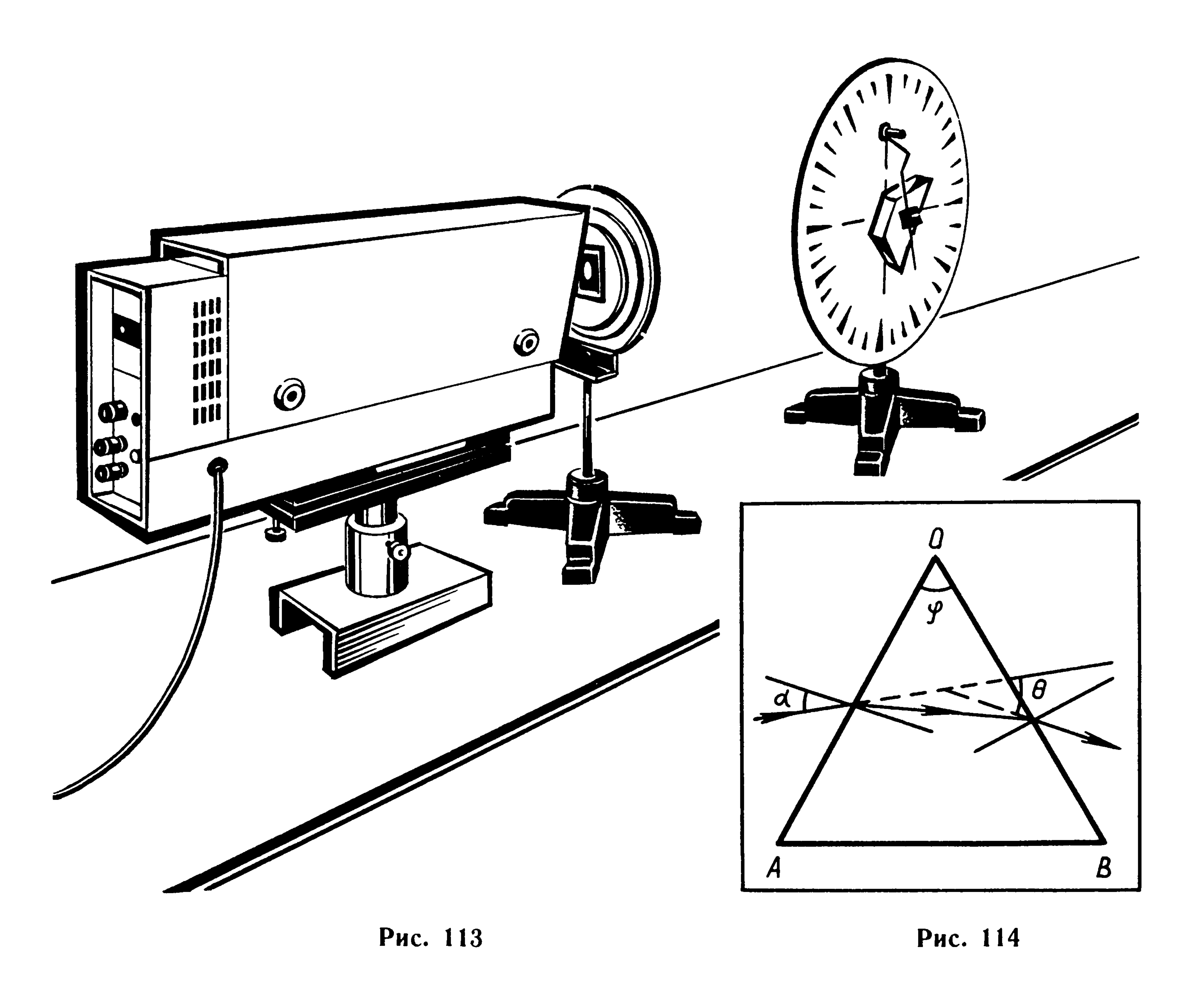


Рис. 113 Рис. 114

показывают соответствующее изменение угла отклонения. Делают вывод о том, что угол отклонения (рис. 114) зависит от преломляющего угла, показателя преломления материала призмы и угла падения.

Опыты 124—126. Полное отражение

Цель опыта — исследовать явления, происходящие при переходе света из оптически более плотной среды в менее плотную. По результатам опыта установить условия возникновения полного отражения света и дать определение предельного угла полного отражения. Возможны два варианта постановки данного опыта:

1. Собирают установку по рисунку 115. Лазерный луч направляют на выпуклую поверхность полуцилиндрической линзы. Вследствие перпендикулярности падения луч проходит границу раздела выпуклая поверхность линзы — воздух без преломления и падает на плоскую поверхность линзы. При перпендикулярном падении на плоскую поверхность он также распространяется без изменения направления (рис. 116). Обращают внимание учащихся на то, что в данном опыте исследуются явления, происходящие при падении

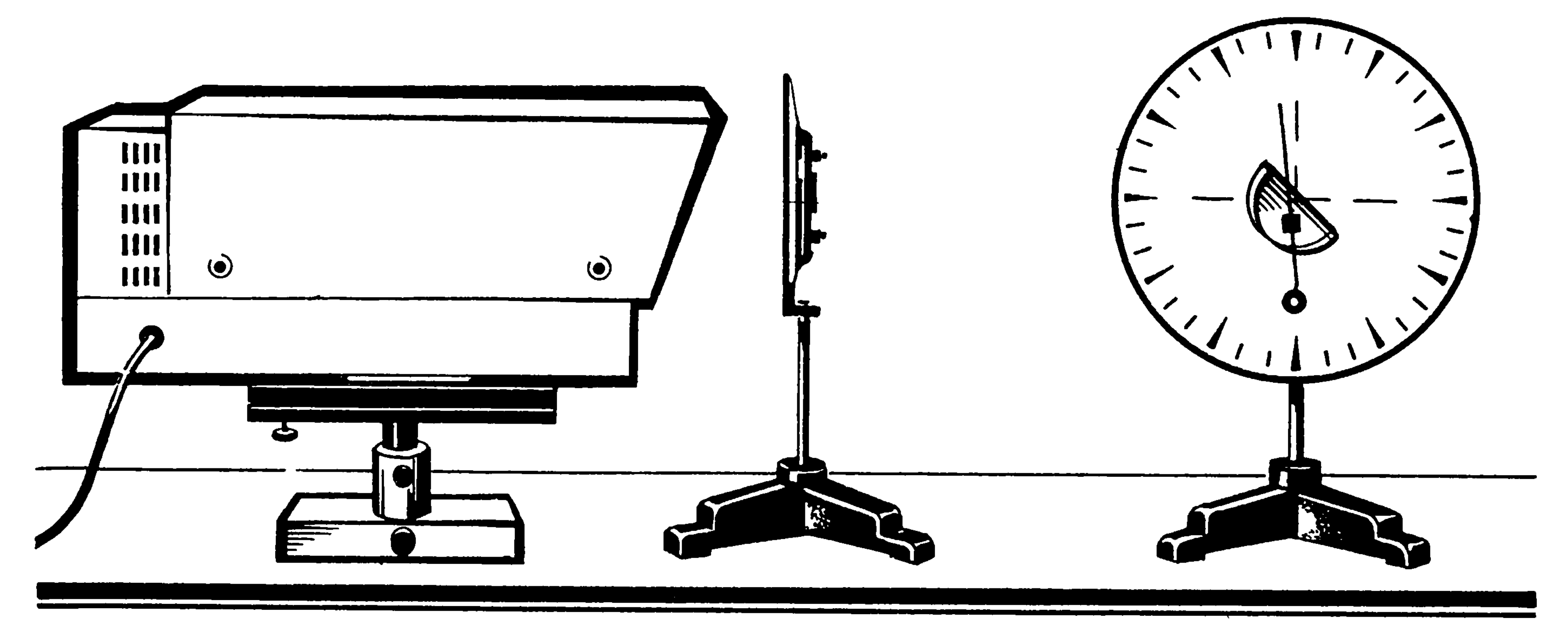


Рис. 115

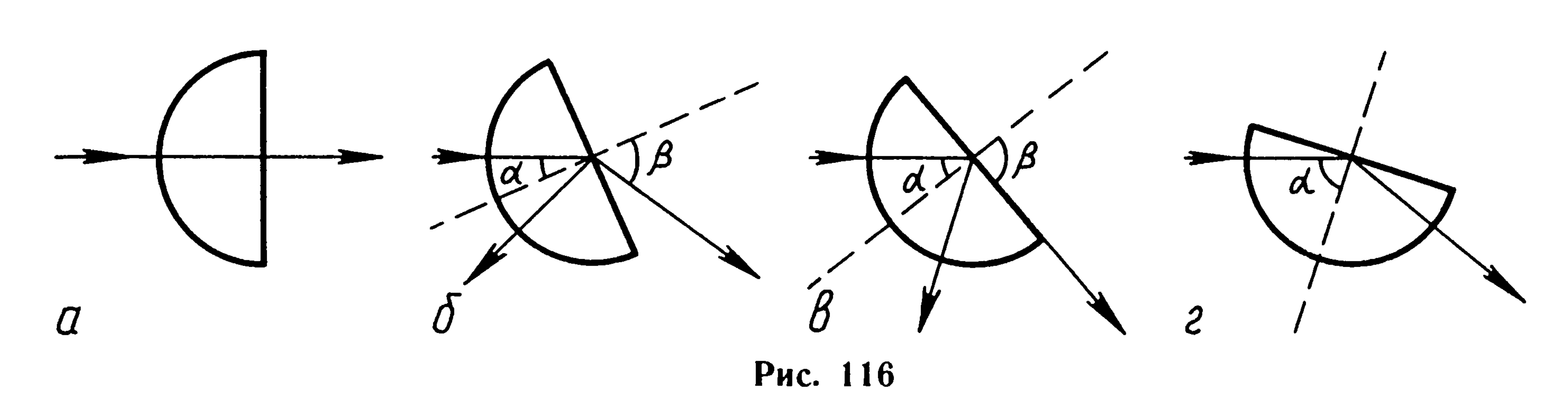


Рис. 116

лазерного луча на границу раздела стекло — воздух, т. е. на плоскую грань линзы. Поворачивая линзу, постепенно увеличивают угол падения луча на плоскую грань. При этом каждый раз на границе раздела стекло — воздух наблюдается одновременно и отражение и преломление света (рис. 116, *б*). Обращают внимание учащихся на то, что яркость отраженного луча по мере увеличения угла падения увеличивается, а преломленного — уменьшается. Угол преломления все время остается больше угла падения. При некотором угле падения угол преломления станет равным 90° (рис. 116, *в*). При этом преломленный пучок скользит вдоль границы раздела двух сред. При дальнейшем незначительном увеличении угла падения пучок полностью исчезает и падающий пучок полностью отражается (рис. 116, *г*). На основании опыта вводится понятие о предельном угле полного отражения.

2. Собирают установку, изображенную на рисунке 111, *б*. Осветитель прибора для изучения законов оптики помещают в крайнее верхнее положение. При этом луч падает как на цилиндрическую, так и на плоскую поверхности линзы перпендикулярно и выходит из них без изменения своего направления. Плавно отклоняя осветитель от вертикального положения, изменяют угол падения луча на плоскую грань. При этом изменяется и угол преломления, все время оставаясь больше, чем угол падения. Угол падения луча увеличивают до тех пор, пока угол преломления не приблизится к 90°.

3. Собирают установку, изображенную на рисунке 111, *в*. Перед объективом располагают широкую горизонтально расположенную щель. Воду в аквариуме надо подкрасить флюоресцеином или хвойным экстрактом для ванн. На дно аквариума помещают плоское зеркало. Порядок демонстрации аналогичен описанному выше.

Опыты 127—129. Модель световода

Цель опыта — ознакомить учащихся с возможностью практического использования полного отражения света.

1. Простейшая модель световода представляет собой пластину из органического стекла шириной 20 мм и длиной 250 мм. Ее вырезают из листа оргстекла толщиной 10 мм. Три стороны пластины полируют куском ткани, смоченной керосином и покрытой тонким слоем пасты ГОИ. Одну сторону размером 20×250 мм отматируют с помощью наждачной шкурки.

Собрав установку по рисунку 117, пучок света лазера направляют перпендикулярно на один из концов пластины как можно ближе к верхней стороне. При этом пучок света, пройдя полоску без изменения своего направления, падает на экран, образуя освещенное пятно определенной яркости. Затем, меняя положение пластины, пучок лазера направляют под таким углом к ее концу, чтобы он многократно отразился от верхней и нижней поверхностей пластины (рис. 118). Учащимся сообщают, что такое многократное отражение света используется в световодах. Сравнивая яркости световых пятен на экране от пучка света лазера, непосредственно падающего на экран и проходящего через пластину после многократного полного отражения, делают вывод о том, что с помощью световодов можно передавать свет практически без потерь.

2. Струя воды в воздухе представляет собой простейший световод, где свет, претерпевая многократное полное отражение от границы раздела воды с воздухом, может передаваться вдоль струи от одного конца до другого.

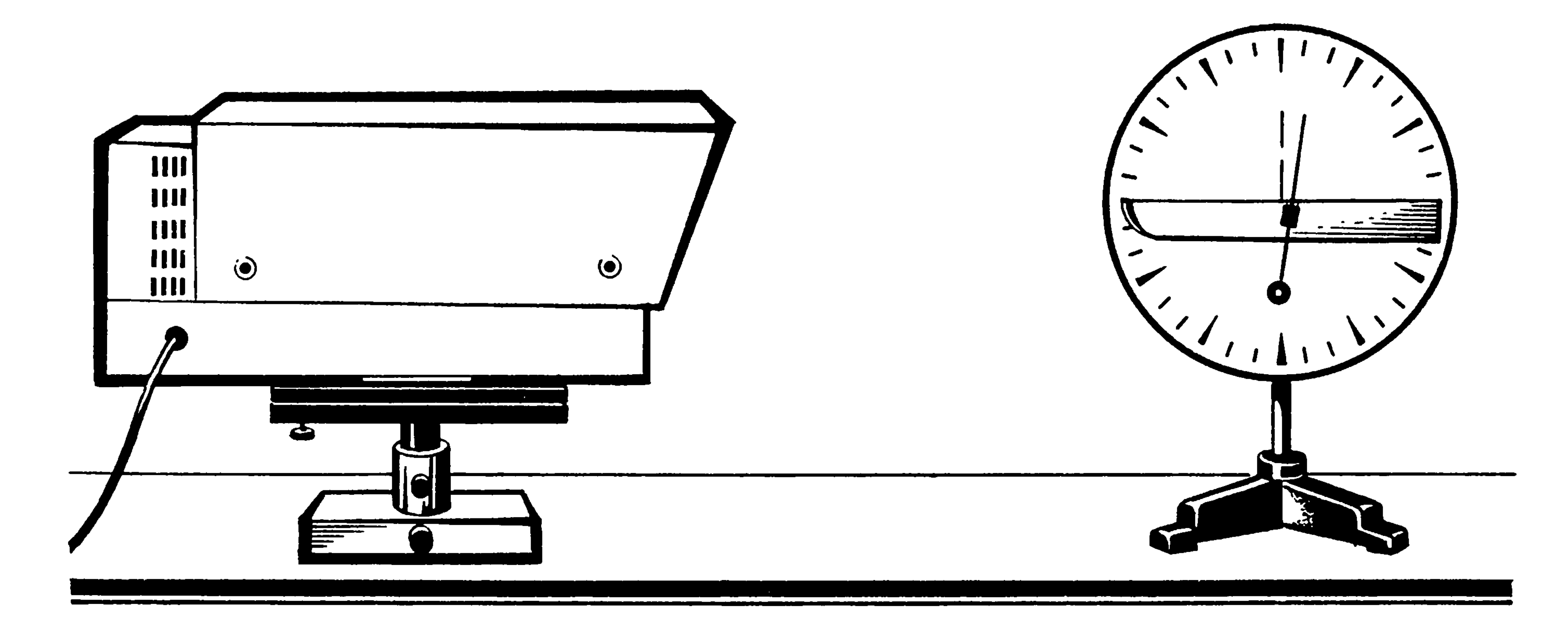


Рис. 117

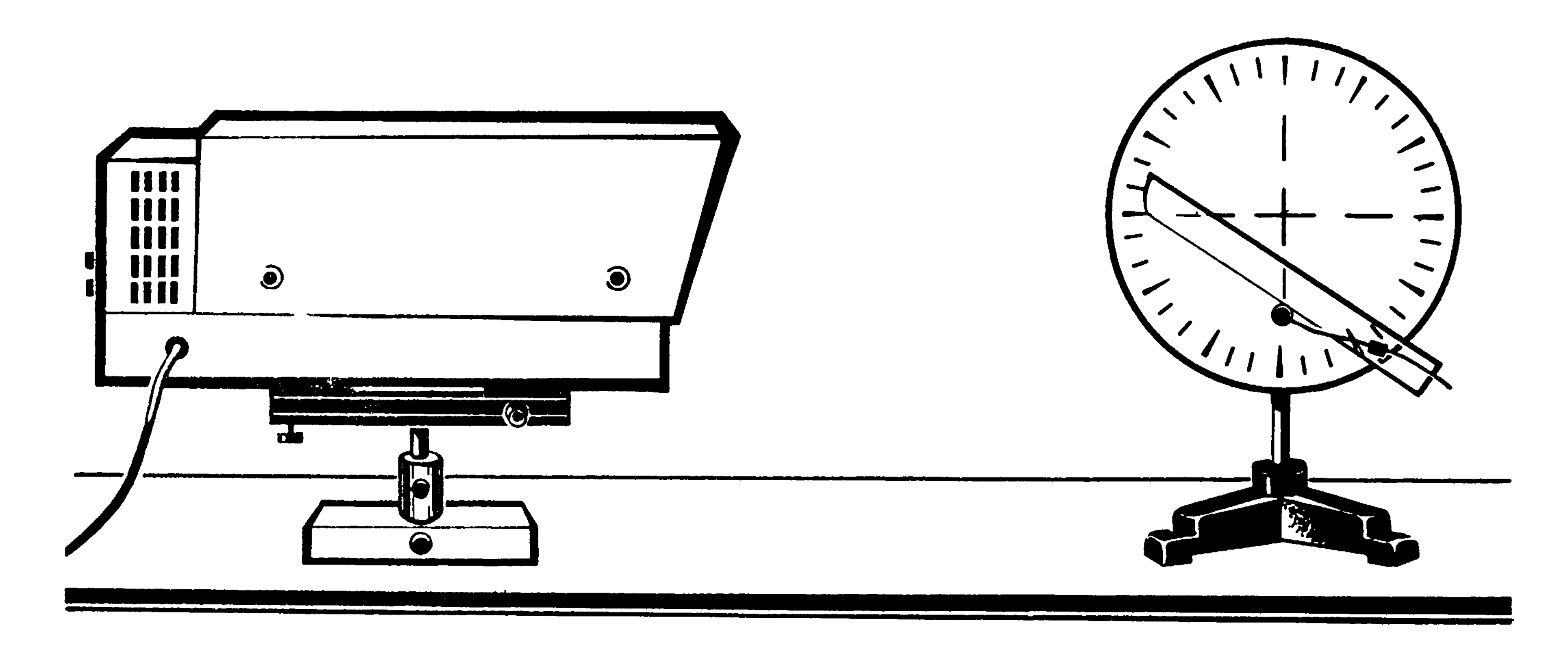


Рис. 118

Установка для демонстрации опыта изображена на рисунке 119. В опыте используется самодельный прибор, который представляет собой сосуд из листового железа высотой 40 см. В нижней части он имеет стеклянное окошко, напротив него расположен кран с диаметром отверстия 5—7 мм. Прибор не требует никакой настройки. Единственным условием успешного проведения опыта является прохождение лазерного луча через центр окошка и отверстие крана. Включают лазер, открывают кран. При этом из отверстия будет вытекать цветная струя. На месте падения струи в сосуде наблюдается яркий свет, что свидетельствует о переносе света из одного места в другое. Свечение струи происходит вследствие частичного рассеяния света в связи с присутствием в ней воздушных пузырьков.

С понижением уровня воды в приборе струя наклоняется круче по отношению к входящему в нее световому пучку. Начиная с некоторого момента времени условие полного отражения света нарушается и струя перестает светиться. При этом на экране против отверстия образуется световое пятно, имеющее цвет испускаемого лазером света.

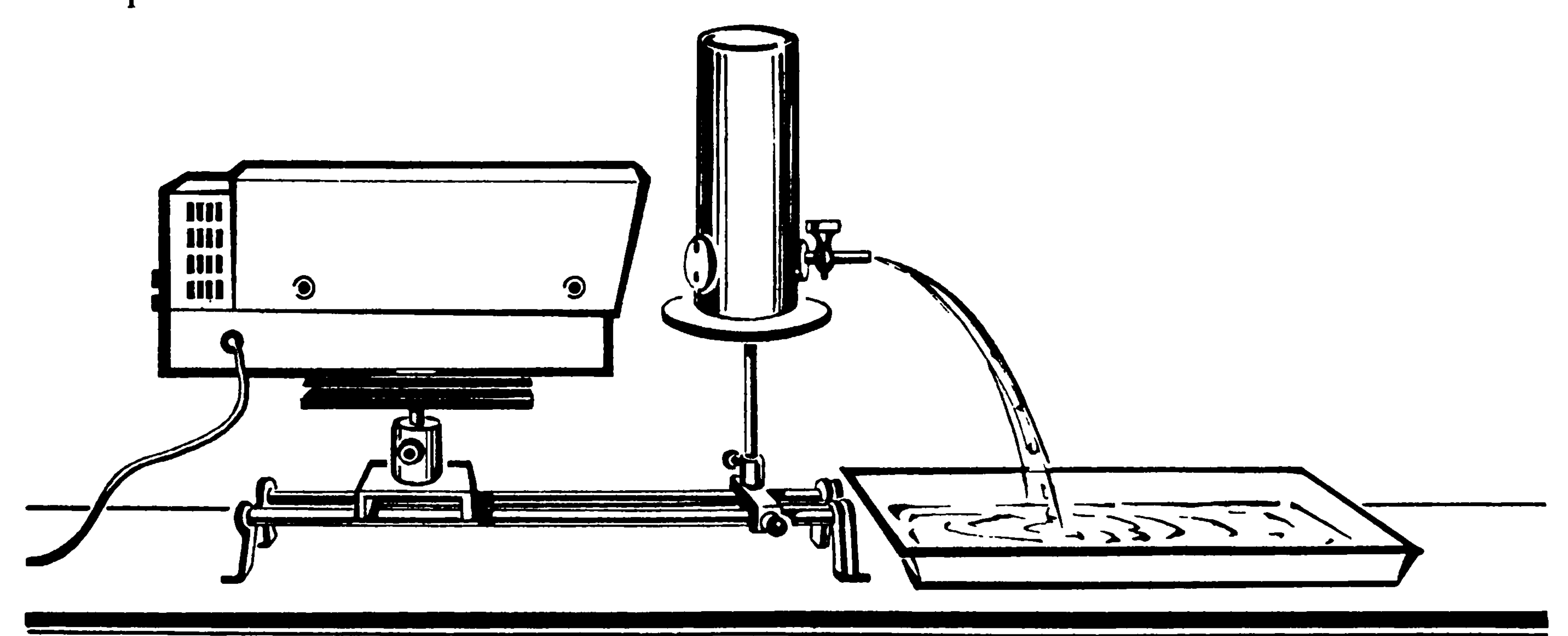


Рис. 119

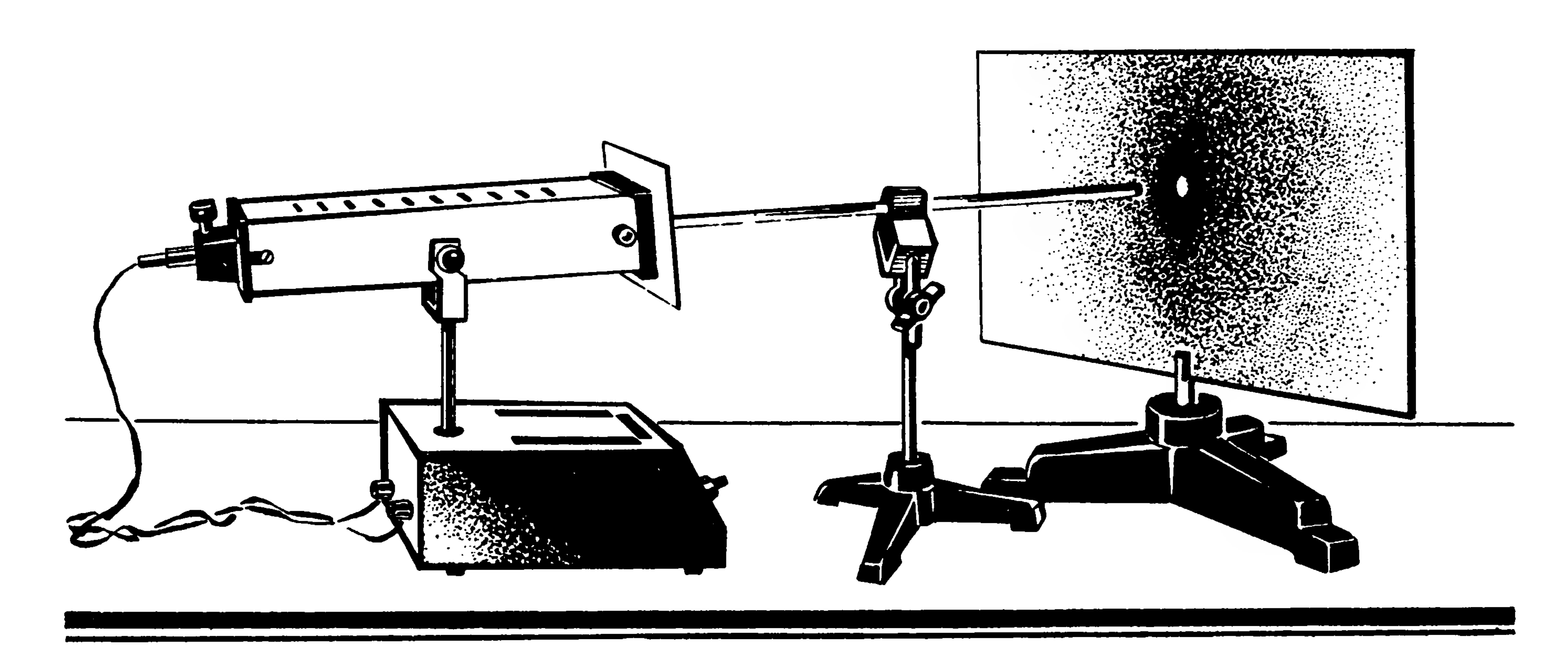


Рис. 120

Эффект светящейся струи находит применение в устройствах «поющих фонтанов».

3. Установка для демонстрации опыта изображена на рисунке 120. Как и предыдущий, опыт проводится в затемненном классе. Прямой или изогнутый стеклянный стержень закрепляют к осветителю для теневого проецирования с помощью самодельной насадки или лапки штатива. Затем включают осветитель и наблюдают слабое свечение стержня и яркое свечение его свободного конца. Учащимся объясняют, что внутри стержня происходит многократное полное отражение света от поверхности раздела стекло — воздух. Дойдя до конца стержня, свет излучается в воздух. Как и струя воды в предыдущем опыте, стержень светится из-за незначительного рассеяния света вследствие его неоднородности (наличие воздушных пузырьков, микротрещин и т. д.). С уменьшением диаметра стержня уменьшается потеря света. Учащимся сообщают, что световод, применяемый на практике, состоит из множества тонких стеклянных волокон. С помощью такого световода можно передавать не только свет, но и изображение и звуковые сигналы.

Опыт 130. Передача изображения по световоду

Установка для демонстрации опыта изображена на рисунке 121. На оптическую скамью проекционного аппарата устанавливают диапроектор «Свитязь» и с помощью объектива добиваются равномерного и яркого освещения экрана, расположенного на значительном расстоянии. Затем непосредственно за объективом диапроектора «Свитязь» устанавливают диафрагму. Вплотную к отверстию диафрагмы располагают диапозитив и один конец световода. При этом изображение рисунка на диапозитиве переносится с этого конца световода на другой конец. Небольшое число учащихся могут наблюдать это изображение визуально. Для наблюдения изображения всем классом его необходимо увеличить. Для этого на небольшом

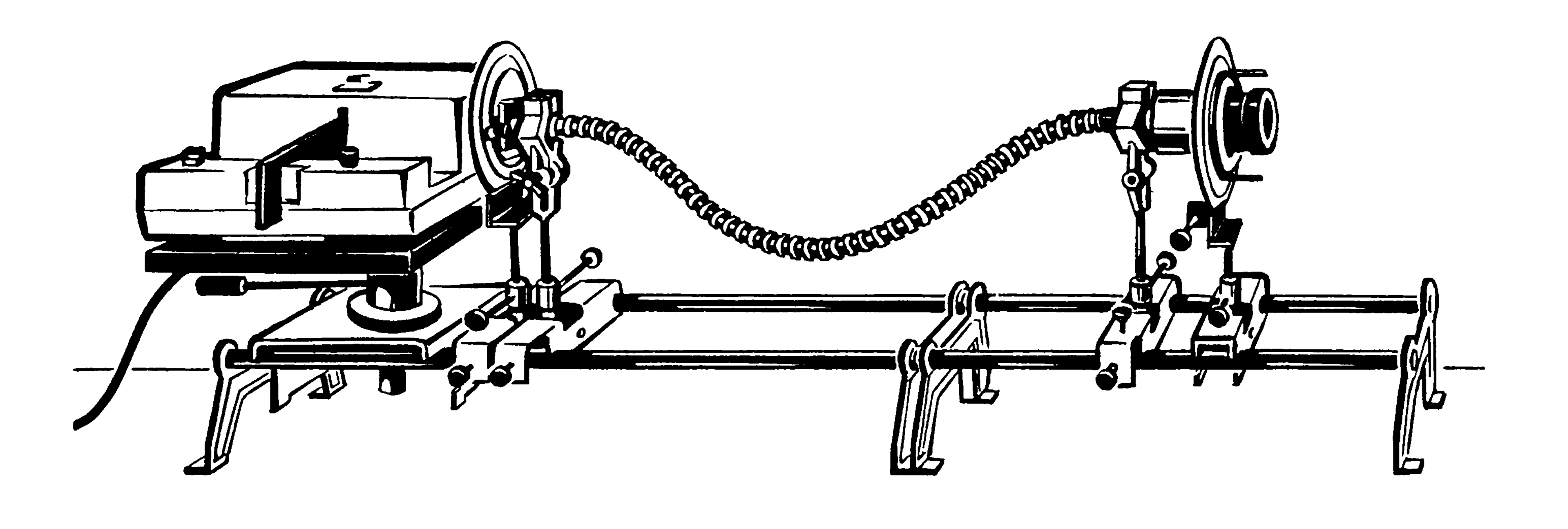


Рис. 121

расстоянии от рисунка на матовом торце световода располагают объектив от фильмоскопа. Плавно перемещая объектив по оптической скамье, получают на экране четкое увеличенное изображение рисунка.

Многократное и полное отражение света в световоде позволяет передавать изображение по любому пути. Взяв левой рукой второй конец световода, а правой — объектив, можно проецировать изображение на экран, располагая его слева, справа и т. д.

Опыт 131. Принцип работы гастроскопа

Цель опыта — ознакомить учащихся с практическим применением волоконной оптики в медицине.

Опыт проводится на установке, изображенной на рисунке 122. Самодельная коробка, применяемая в данном опыте, играет роль внутреннего органа человека. Отверстия на крышке коробки служат для введения двух световодов. Один из них служит для освещения наблюдаемого объекта, другой — для наблюдения. Для лучшего отражения света дно коробки делается светлым, в его центре проводится черной тушью прямая линия.

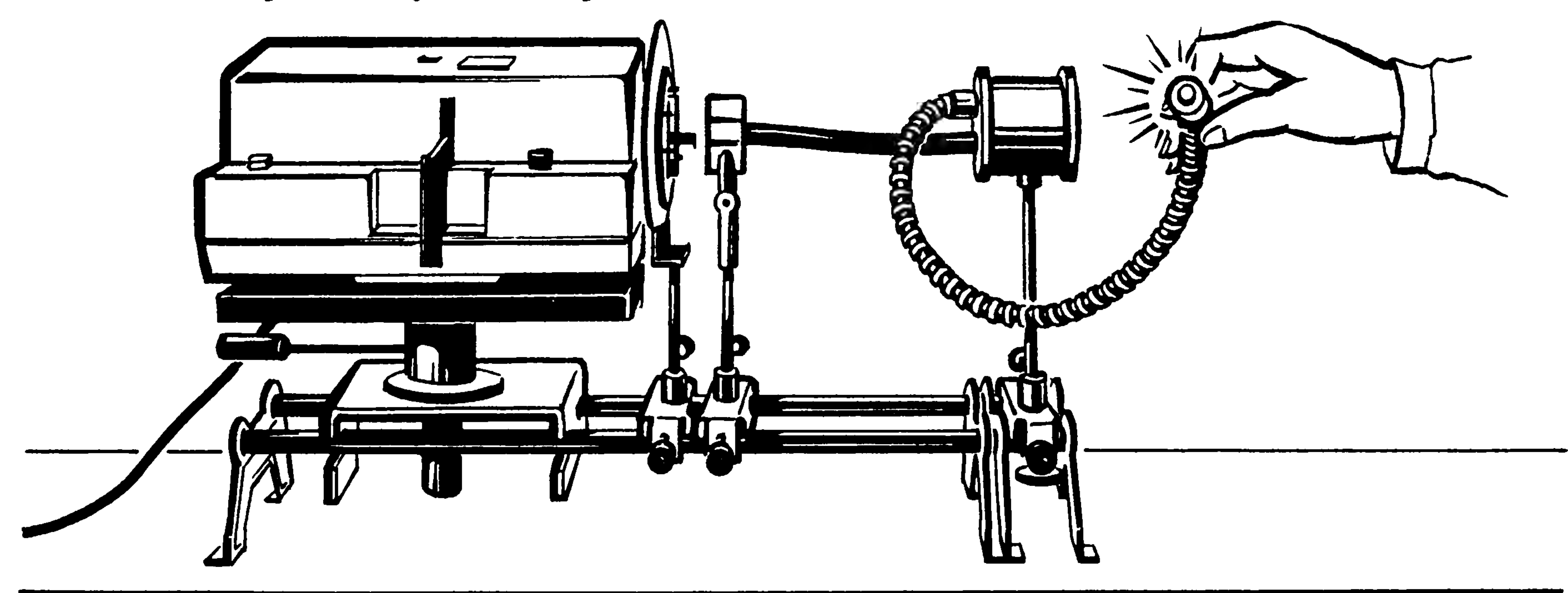


Рис. 122

В начале опыта, открыв крышку коробки, учащимся показывают дно коробки. Затем крышку закрывают. Один конец световода закрепляют к объективу диапроектора «Свитязь», а другой вставляют в отверстие коробки. Включают диапроектор «Свитязь». При этом через световод освещается дно коробки. С помощью второго световода, установленного во второе отверстие, получают на матовом экране изображение линии. Потом это изображение проецируют на экран, как и в предыдущем опыте.

Опыт 132. Освещение при помощи световода

Опыт проводится на установке, изображенной на рисунке 123. В осветитель для теневого проецирования устанавливают круглую диафрагму диаметром 10 мм. К нему вплотную с помощью лапки штатива на рейтере закрепляют один конец световода. К другому концу прикрепляют шарообразную насадку из оргстекла. Включают осветитель и наблюдают яркое свечение шарообразной насадки. Учащимся объясняют, что насадка играет роль источника света. Такая передача света на практике используется при освещении складов для хранения легковоспламеняющихся или взрывоопасных веществ. Применение электрического освещения в таких складах может привести к взрыву из-за возникновения искр между контактами выключателей в момент включения или выключения электрического тока, в местах контакта проводников, находящихся под напряжением.

Опыт 133. Суперпозиция волн

Часто принципу суперпозиции волн при объяснении волновых процессов не уделяют должного внимания, считая, что он очевиден и что учащиеся его понимают весьма легко. Тем не менее явление суперпозиции должно быть показано на опыте.



Рис. 123

Для этого собирают установку, изображенную на рисунке 75. Затем возбуждают одновременно две одиночные волны. Наблюдают, что каждая волна движется независимо одна от другой, как будто второй волны нет.

Результирующее смещение в месте встречи волн равно векторной сумме смещений, вызываемых каждой из волн в отдельности.

Опыты 134—138. Интерференция волн

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 86. Насадив на шток вибратора двойную насадку, включают осветитель. Затем регулируют частоту колебаний вибратора и добиваются наиболее выразительной интерференционной картины на экране (рис. 124).

Установив над источником света стробоскопический диск, насаженный на ось универсального двигателя, регулируют реостатом скорость вращения так, чтобы интерференционная картина стала неподвижной. Подсчитывают число полуволн от источников до выбранной точки и показывают, что при разности хода, равной четному числу полуволн, получается максимум, а при разности хода, равной нечетному числу полуволн,— минимум.

Обращают внимание на то, что для получения устойчивой интерференционной картины источники волн должны быть когерентными. Эту мысль иллюстрируют следующим образом. На шток вибратора надевают насадку с одним шариком. Включают вибратор и, установив небольшую частоту, наблюдают распространение волн. Затем возбуждают пружинный вибратор, входящий в комплект деталей к волновой ванне, и создают вторую систему волн. На экране видно, что в этом случае положение максимумов и минимумов постоянно меняется, и устойчивой интерференционной картины не наблюдается. «Остановив» с помощью стробоскопа одну систему волн (лучше ту, которая возбуждается основным вибратором), наблюдают, как движется вторая система волн.

Анализируя проделанные эксперименты, обращают основное внимание на формирование представлений о когерентных источниках волн. Учащиеся должны твердо усвоить, что когерентными источ-

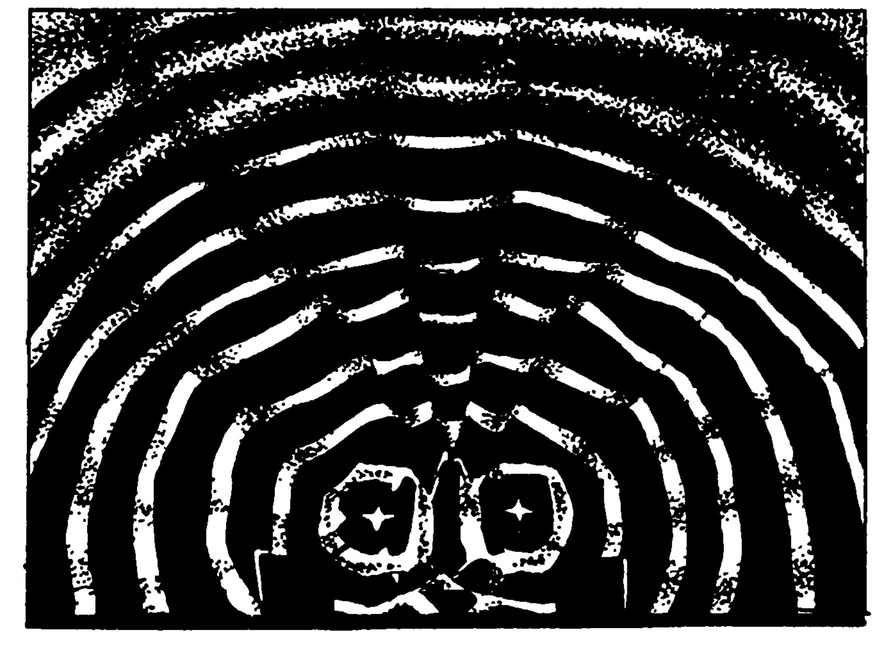
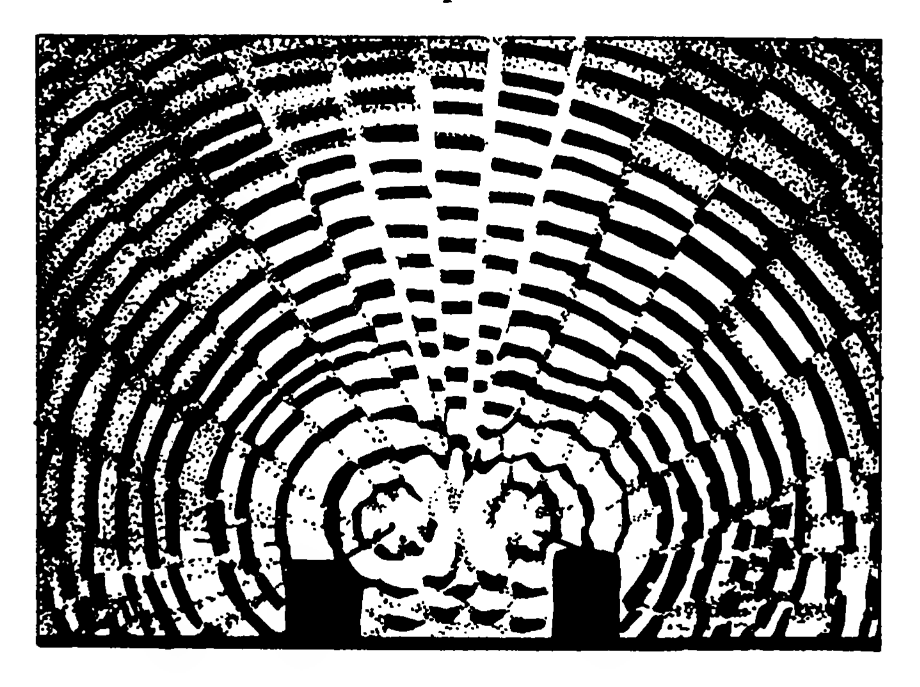



Рис. 124

никами являются такие, которые имеют одинаковые частоты колебаний и постоянную разность фаз. Для гармонических источников достаточно только первого условия. Гармонические источники волн когерентны при равенстве частот.

2. Для демонстрации интерференции звуковых волн собирают установку, изображенную на рисунке 125. Отмечают, что в этой установке громкоговорители являются источниками когерентных волн. Для того чтобы колебания диффузоров громкоговорителей происходили в одной фазе, их подключают параллельно.

Установив частоту звукового генератора в диапазоне от 1 до 4 кГц, включают усилитель и один из громкоговорителей и замечают, что стрелка вольтметра отклоняется. Это свидетельствует о наличии звуковых волн в точке, где находится микрофон.

Включают второй громкоговоритель. Угол отклонения стрелки вольтметра либо увеличится, либо уменьшится: все зависит от разности хода волн, излучаемых громкоговорителями.

Медленно приближая (или отодвигая) один из громкоговорителей от микрофона, замечают по вольтметру, что напряжение колеблется. Это говорит об интерференции звуковых волн, доходящих до микрофона. Надо следить за тем, чтобы громкость звучания была небольшой; в противном случае могут сказаться эффекты, связанные с отражением волн от стен помещения.

3. Для наблюдения интерференции электромагнитных волн собирают установку, изображенную на рисунке 107, *а*, но без линзы. Рупорную антенну закрывают металлической пластиной размером 7×15 см, у которой «длинные» концы загнуты так, чтобы она надевалась на рупор (рис. 126, *а*). Между пластиной и боковыми стенками рупора образуются щели шириной около 2 см.

Электромагнитные волны, идущие от антенны генератора, дифрагируя на щелях, создают два пучка расходящихся волн. В месте перекрытия пучков с помощью дипольного приемника обнаруживают нулевой и по 1—2 максимума справа и слева от него, что свидетельствует об интерференции волн.

Закрывая металлической пластиной то одну, то другую щель, убеждаются в отсутствии интерференции.

4. Объяснив учащимся идею опыта Ллойда, собирают установку, изображенную на рисунке 126, *б*. Включив установку, обнаруживают наличие приема электромагнитных волн приемником.

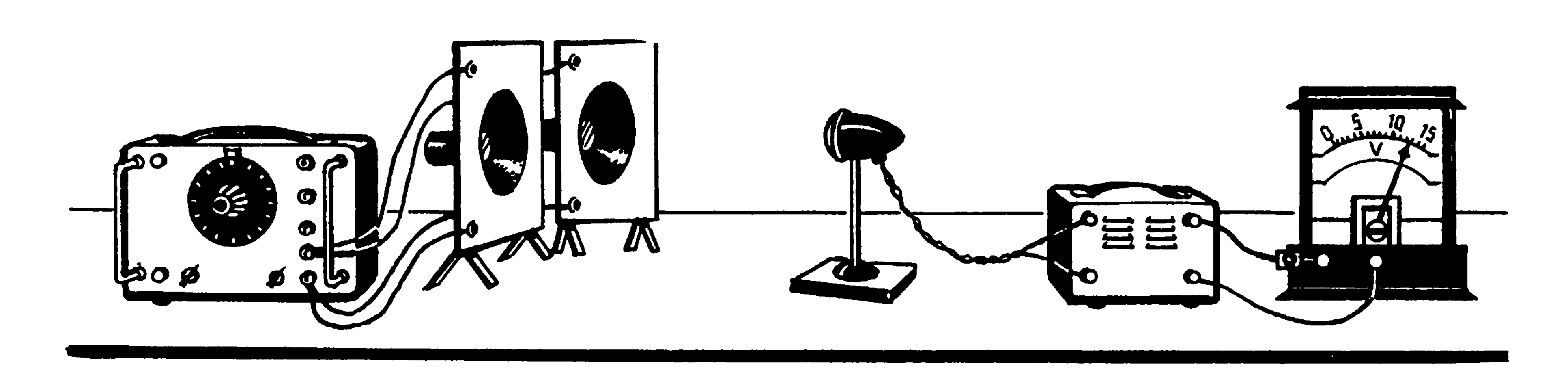


Рис. 125

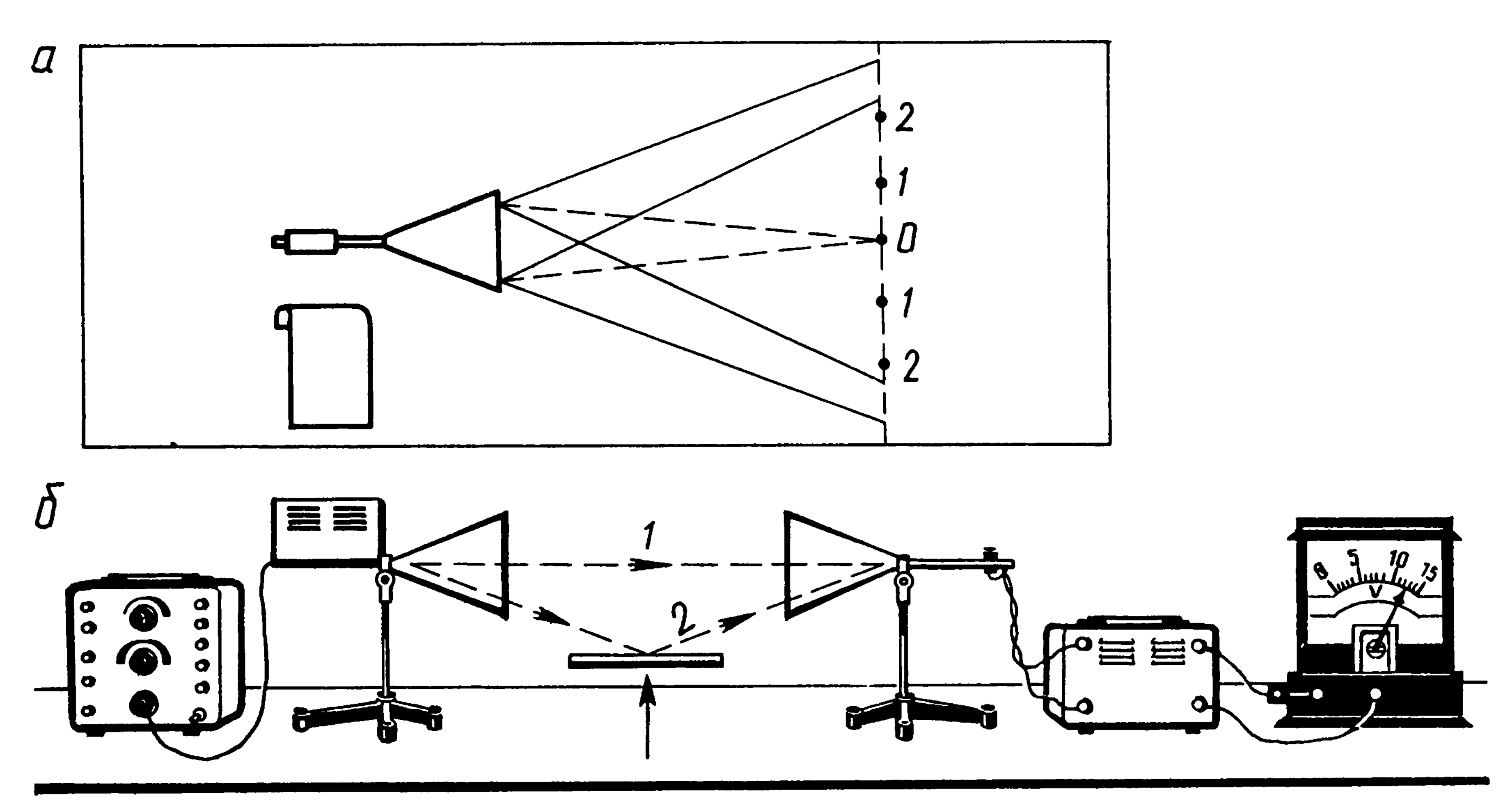


Рис. 126

В пространство между генератором и приемником снизу вносят металлический лист (зеркало). Замечают, что происходит либо усиление, либо ослабление принятого сигнала. Объясняют, что происходит интерференция прямого пучка волн и волн, отраженных от зеркала.

Передвигая зеркало в направлении, указанном стрелкой, наблюдают несколько последовательных усилений и ослаблений приема. Объясняют это тем, что при движении зеркала меняется разность хода между прямым и отраженным пучками волн.

5. Для проведения опыта с бизеркалами Френеля собирают установку, показанную на рисунке 127. Угол между зеркалами $З_1$ и $З_2$ должен быть порядка 170—175°. Затем объясняют идею опыта, пользуясь рисунком 128. Включив установку, наблюдают наличие либо отсутствие приема. Передвигая приемник по дуге, центр которой лежит на ребре бизеркала, наблюдают отчетливую картину интерференции: зона приема постепенно переходит в зону отсутствия приема, а последняя — в зону приема и т. д. Обычно обнаруживается 4—6 максимумов и соответственно 5—7 минимумов.

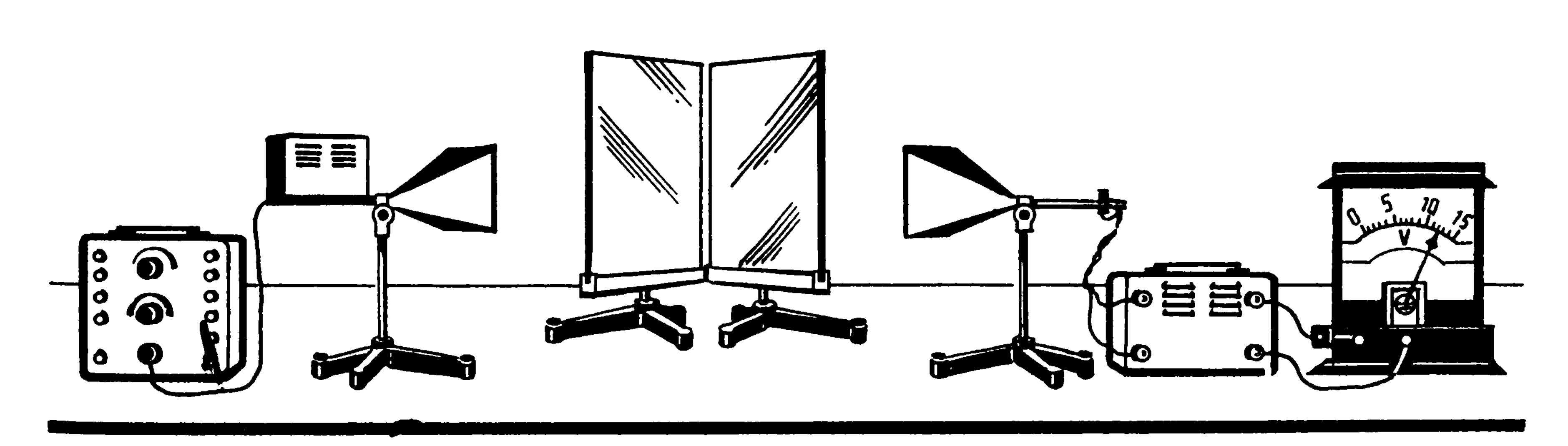


Рис. 127

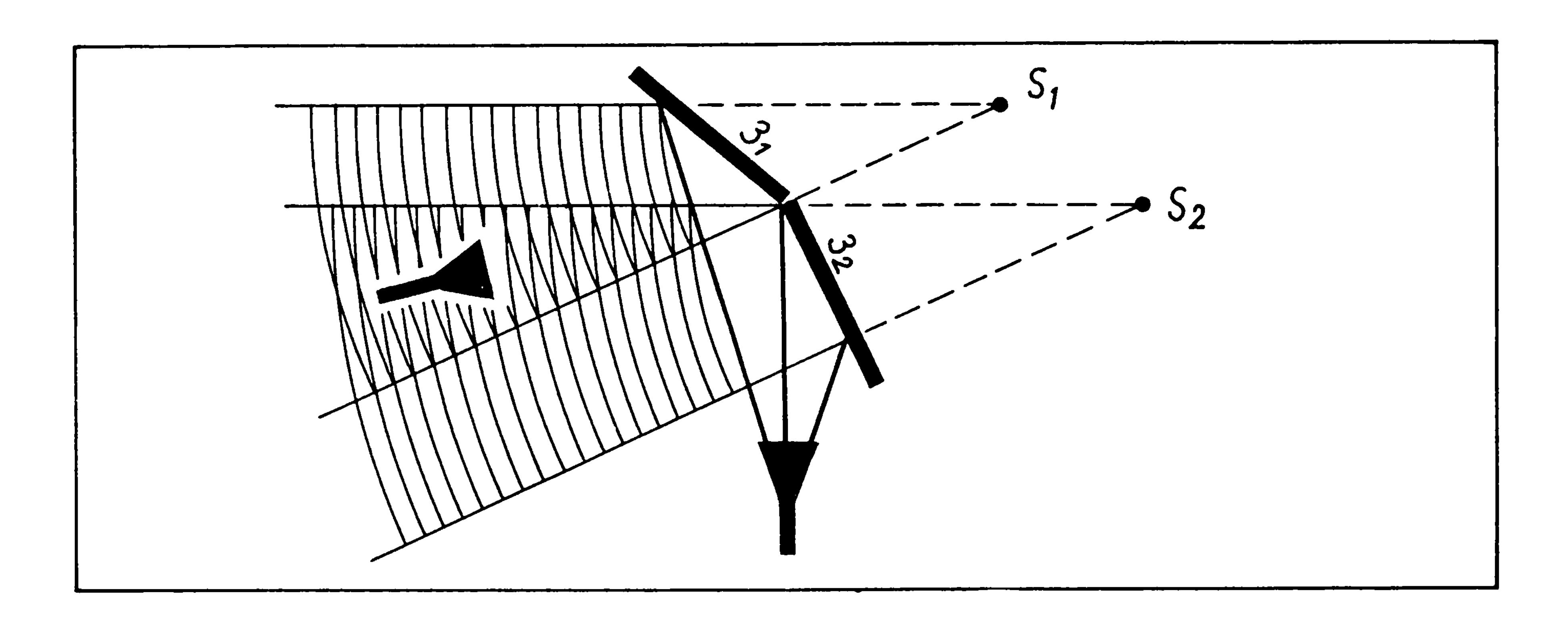


Рис. 128

6. Для демонстрации интерференции волн, разделенных бипризмой, собирают установку, изображенную на рисунке 129. Сообщают учащимся, что призмы, образующие бипризму, изготовлены так, что их показатель преломления меньше единицы; поэтому они отклоняют падающие на них волны не к основаниям, а к вершинам.

Включив генератор, перемещают рупорную антенну на столе по дуге окружности радиусом 60—80 см с центром в месте соприкосновения призм. При этом обнаруживают центральный максимум и по два боковых, расположенных под углами 25 и 40°. Интенсивность побочных максимумом значительно меньше интенсивности центрального.

Следует иметь в виду, что излучение генератора СВЧ линейно поляризовано: вектор напряженности электрической составляющей электромагнитного поля в излучаемой генератором волне параллелен узкой стенке волновода. С другой стороны, металлопластинчатые призмы обладают анизотропией. Для успеха демонстрации важно, чтобы пластины призм были параллельны узким стенкам волновода.

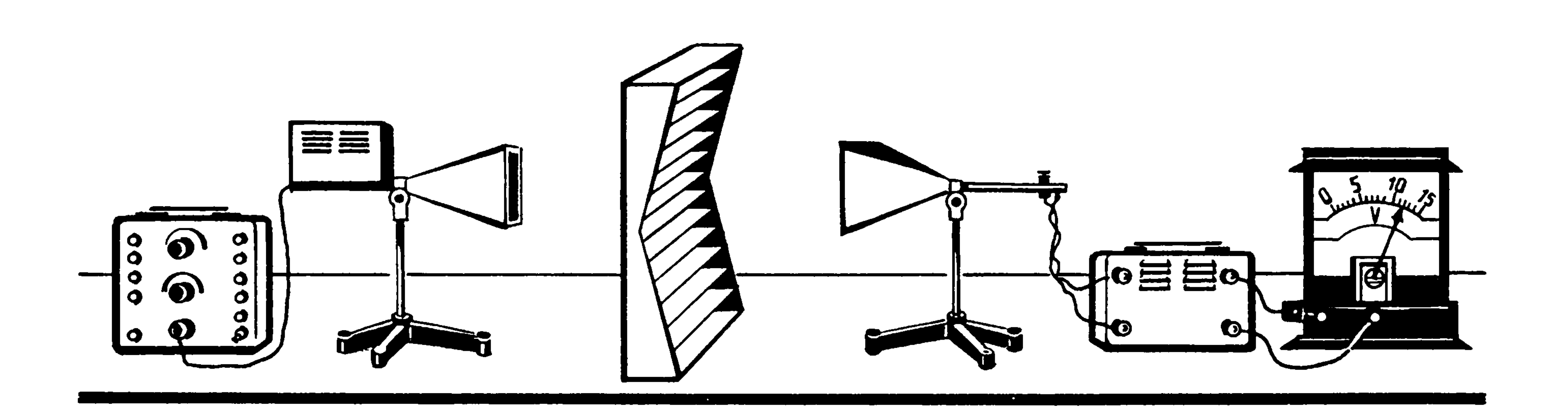


Рис. 129

Опыты 139—142*. Стоячие волны

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 130. Шнур с узлом на верхнем конце должен быть притянут к крюку в потолочной балке с помощью лески, второй конец лески закрепляют на демонстрационном столе.

Включив вибратор, наблюдают в шнуре стоячие волны. Амплитуда стоячих волн зависит от соотношения между частотой свободных колебаний шнура и частотой вынуждающих колебаний вибратора. Регулируя частоту вибратора, добиваются наибольшей выразительности демонстрации.

Обращают внимание учащихся на то, что у закрепленного конца шнура образуется узел стоячей волны.

Остановив вибратор, освобождают закрепленный конец лески и закрепляют ее так, чтобы шнур был подвешен к куску лески длиной приблизительно $^1/_4\lambda$. На столько же укорачивают нижний конец шнура и повторяют опыт. Вновь наблюдают стоячие волны в шнуре. Однако теперь на конце шнура, прикрепленного к леске, образуется пучность стоячей волны.

В классах с углубленным изучением физики при анализе наблюдаемого явления выводят уравнение стоячей волны и аналитически определяют положение максимумов и минимумов.

2. В волновой ванне ставят массивное препятствие и с помощью вибратора с плоской насадкой возбуждают плоские волны. Регулируя частоту колебаний вибратора, добиваются хорошей видимости стоячих волн.

3. С генератором УКВ индуктивно связывают длинную линию, настроенную в резонанс с колебаниями генератора. Присоединяют к линии с помощью пружинящих контактов гальванометр. К одному из пружинящих контактов провод присоединяют через кремниевый диод (рис. 131, *а*).

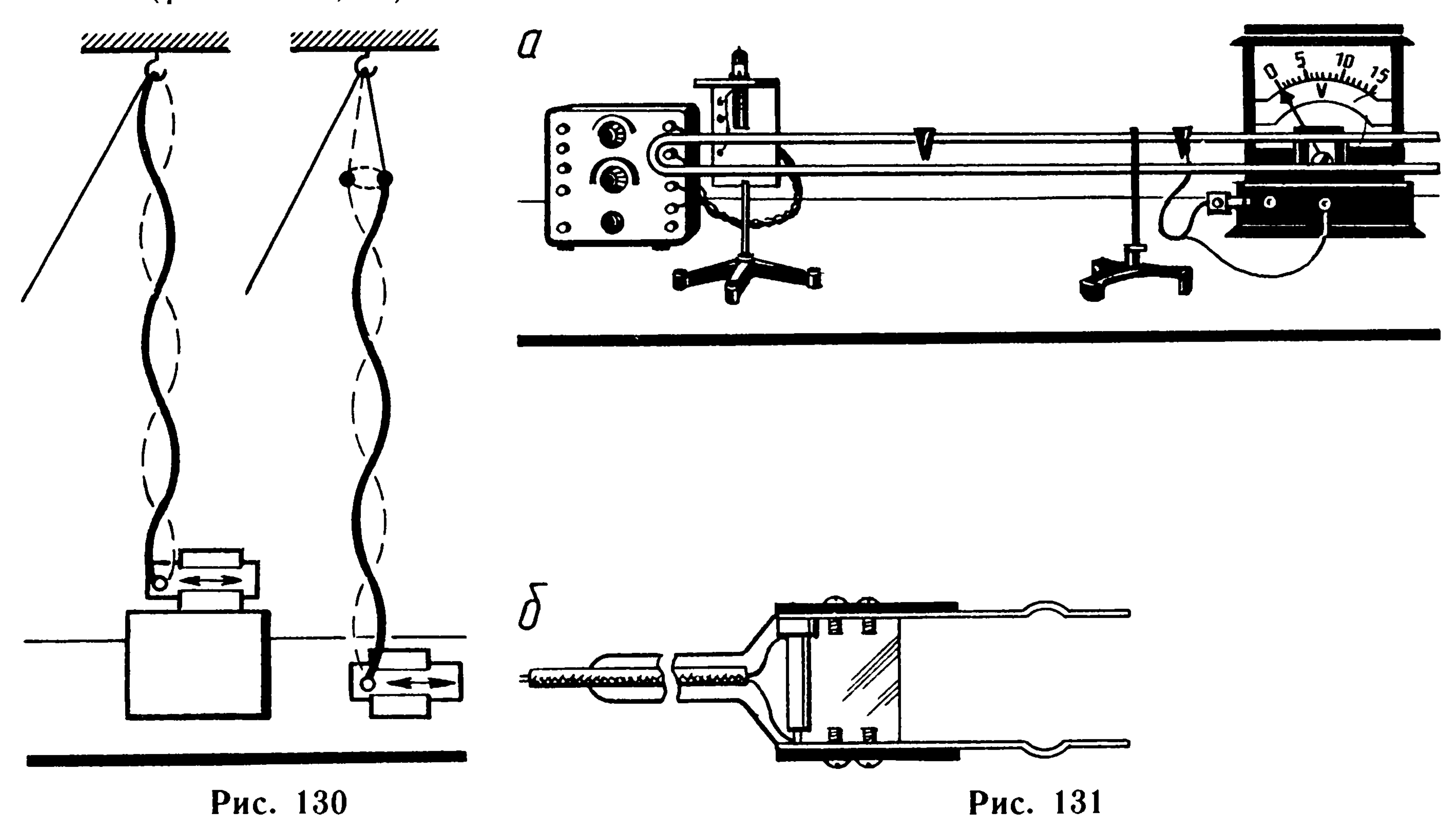


Рис. 130

Рис. 131

Включают выпрямитель и, передвигая пружинящие контакты вдоль линии, находят узлы и пучности напряжения. Пучности напряжения отмечают бумажными полосками (рис. 131, *б*).

Отключают вольтметр и повторяют опыт с неоновой лампочкой, которая хорошо светится в пучностях напряжения.

Обращают внимание учащихся на то, что на разомкнутом конце линии образуется пучность напряжения.

Накоротко замыкают свободный конец линии с помощью металлической скобы и повторяют опыт. Пучности напряжения отмечают теперь бумажными полосками другого цвета. Обращают внимание учащихся на то, что на короткозамкнутом конце линии образуется узел напряжения.

После демонстрации опытов полезно показать первый фрагмент из фильма «Физические основы радио», в котором процессы, происходящие в длинной линии, объяснены с помощью мультипликации.

4. Собирают установку, изображенную на рисунке 132. Включают генератор и усилитель. Перемещая приемный диполь от зеркала к генератору, обнаруживают узлы и пучности стоячих волн.

Опыт 143*. Устройство и принцип работы интерферометра Майкельсона

Вычерчивают на доске схему интерферометра Майкельсона (рис. 133) и объясняют принцип его работы. Затем по этой схеме

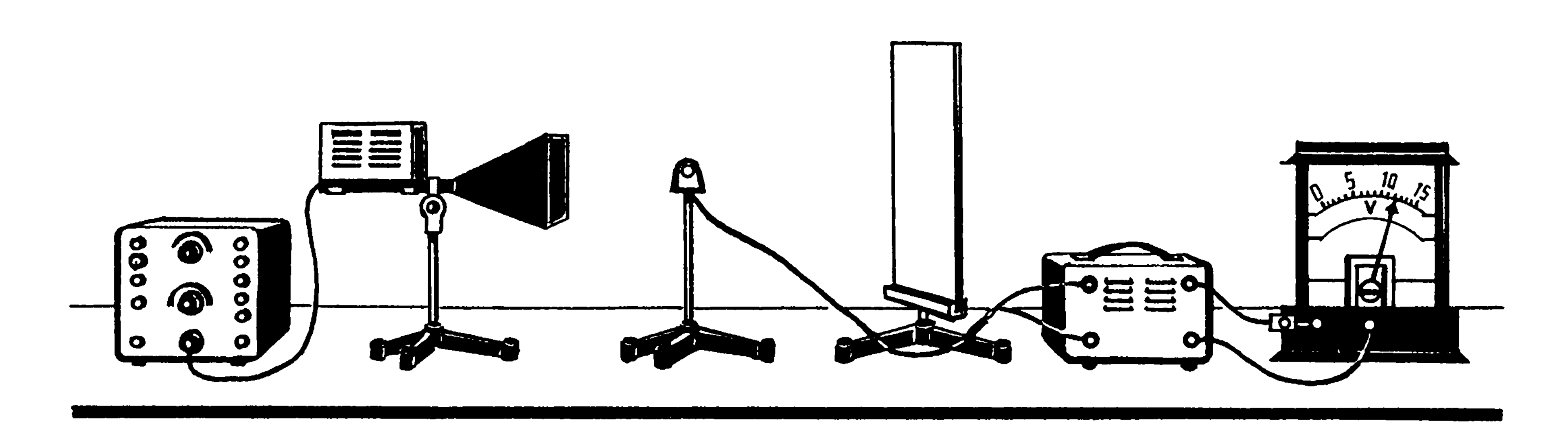


Рис. 132

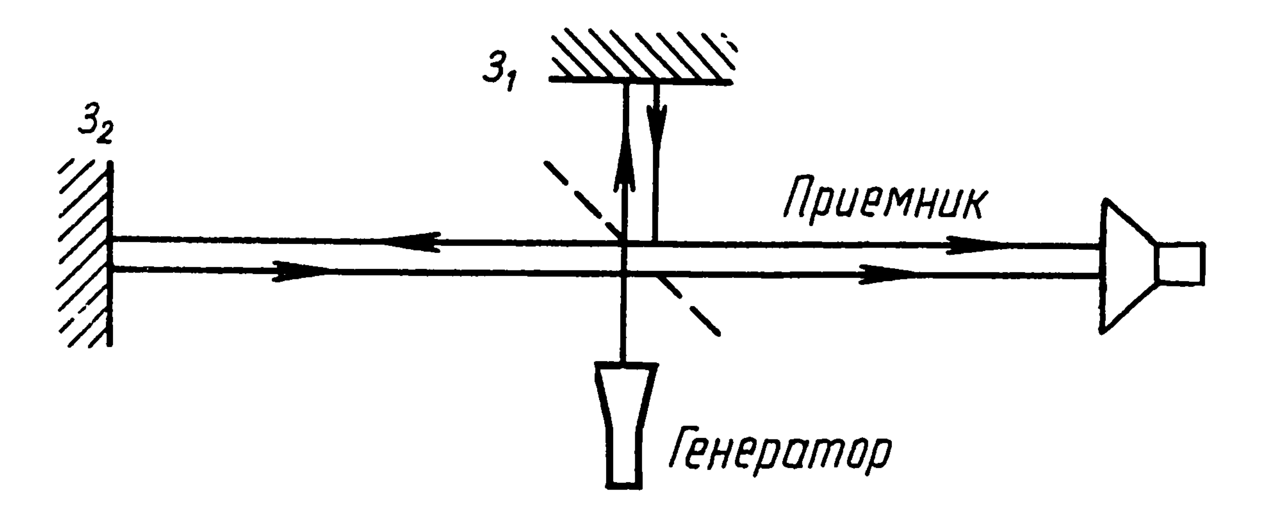


Рис. 133

собирают экспериментальную установку. Включив генератор и усилитель, демонстрируют работу интерферометра, для чего передвигают на 1—3 см зеркало $З_2$ и замечают либо усиление, либо ослабление приема. В качестве полупрозрачного зеркала используется диэлектрическая пластина из комплекта приборов для изучения свойств электромагнитных волн.

Опыты 144—145. Наблюдение интерференции света с помощью бипризмы Френеля

1. Установка для демонстрации опыта изображена на рисунке 134. На оптической скамье проекционного аппарата ФОС располагают лазер, на расстоянии 10—15 см от него — бипризму Френеля. Расстояние между бипризмой и объективом составляет 8—10 см. Экран располагают на расстоянии 1,5—2 м от лазера. При таком расположении приборов пучки света, раздвоенные под бипризмой Френеля, соединяются и на экране дают четкую интерференционную картину в виде чередующихся темных и светлых полос. При медленном движении объектива от бипризмы в сторону экрана можно заметить, как вначале появляются два отдельных пучка света лазера, затем они медленно приближаются друг к другу и, когда начинается их наложение, возникают четкие интерференционные полосы. Размеры картины зависят от расстояния между объективом и экраном: чем больше расстояние, тем больше картина. Однако с целью предотвращения случайного попадания прямого луча лазера в глаза учащихся во всех опытах с применением лазера экран надо располагать на небольшом расстоянии, хотя при этом значительно уменьшаются размеры изображений.

2. При подготовке опыта нужно удалить объектив диапроектора «Свитязь» и вплотную к корпусу установить вертикальную раздвижную щель шириной 0,1—0,05 мм. Установка для проведения

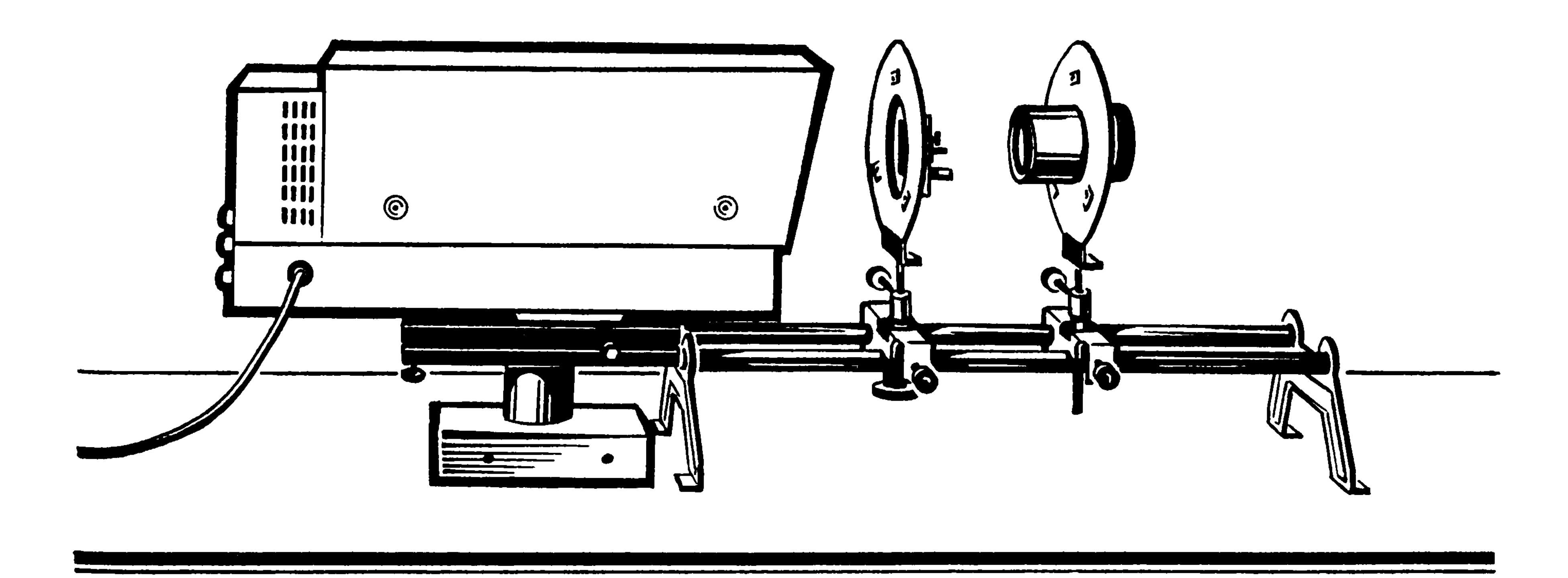


Рис. 134

опыта показана на рисунке 135. Свет от лампы *1* через конденсор *2* попадает в узкую щель *3*, которая и будет служить точечным источником света. За щелью на расстоянии 10—12 см устанавливают бипризму *4* с углом при вершине, близким к 180°. Раздвижную щель и бипризму укрепляют на дисках с поворотным фланцем относительно оптической оси, которые в свою очередь устанавливают на рейтерах с приспособлением для малых поперечных перемещений. Этим достигается параллельность между щелью и гранью призмы. Интерференционную картину наблюдают на экране *5*, установленном на расстоянии 2—2,5 м. Четкость интерференционной картины сразу получить не удается: сначала появляется светлая полоса, размытая в середине. Это происходит вследствие непараллельности щели с гранью призмы. Для получения четкой картины необходимо повернуть щель или призму относительно главной оптической оси до появления четких вертикальных полос. Ширину интерференционной картины можно увеличить наклонением экрана.

Необходимо обратить внимание учащихся на изменение интерференционной картины при увеличении ширины щели. При ширине щели, равной 0,1 мм, на экране видны четкие вертикальные интерференционные полосы. Если она больше, яркость полос растет, но видимость и четкость интерференционной картины ухудшаются. Это объясняется отступлением от требований «точечности» источника света.

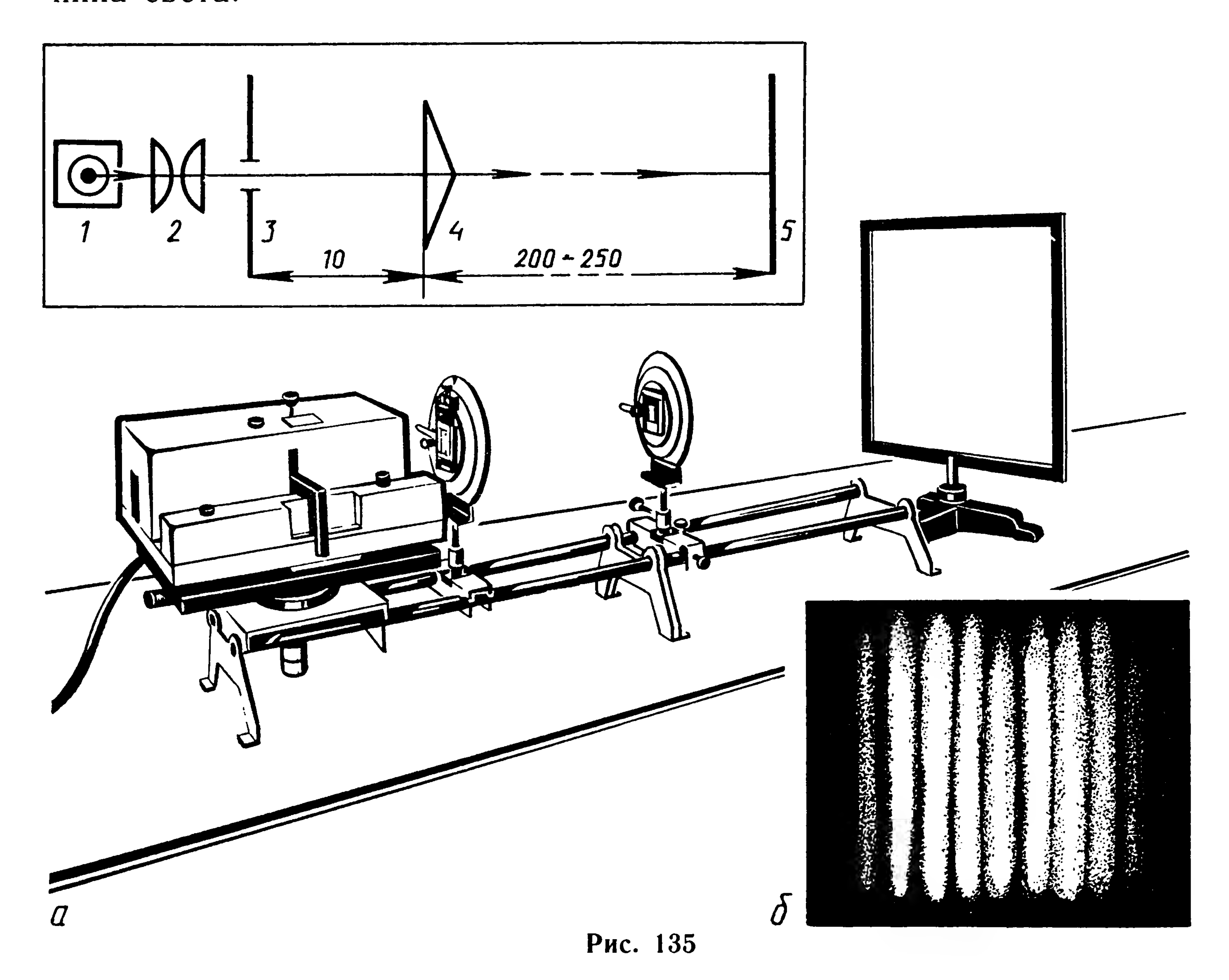


Рис. 135

Сравнивая интерференционные полосы с монохроматическим и белым светом, нужно объяснить учащимся причины их различия.

Опыт 146. Интерференция света от двойной щели Юнга

А. Опыт проводят на установке, изображенной на рисунке 136. Как и в предыдущем опыте, источником света является диапроектор «Свитязь».

Двойную щель Юнга устанавливают на рейтере, допускающем малые поперечные перемещения с целью достижения параллельности со щелью. Ширину раздвижной щели подбирают такую, чтобы интерференционная картина была наиболее четкой и яркой. Ее регулируют также в процессе настройки: критерием при этом является четкость и яркость наблюдаемых полос.

Б. Для наблюдения интерференционной картины с помощью двойной щели Юнга от монохроматического источника света в установке предыдущего опыта вместо диапроектора «Свитязь» устанавливают лазер, вместо раздвижной щели — цилиндрическую линзу (рис. 137, *а*).

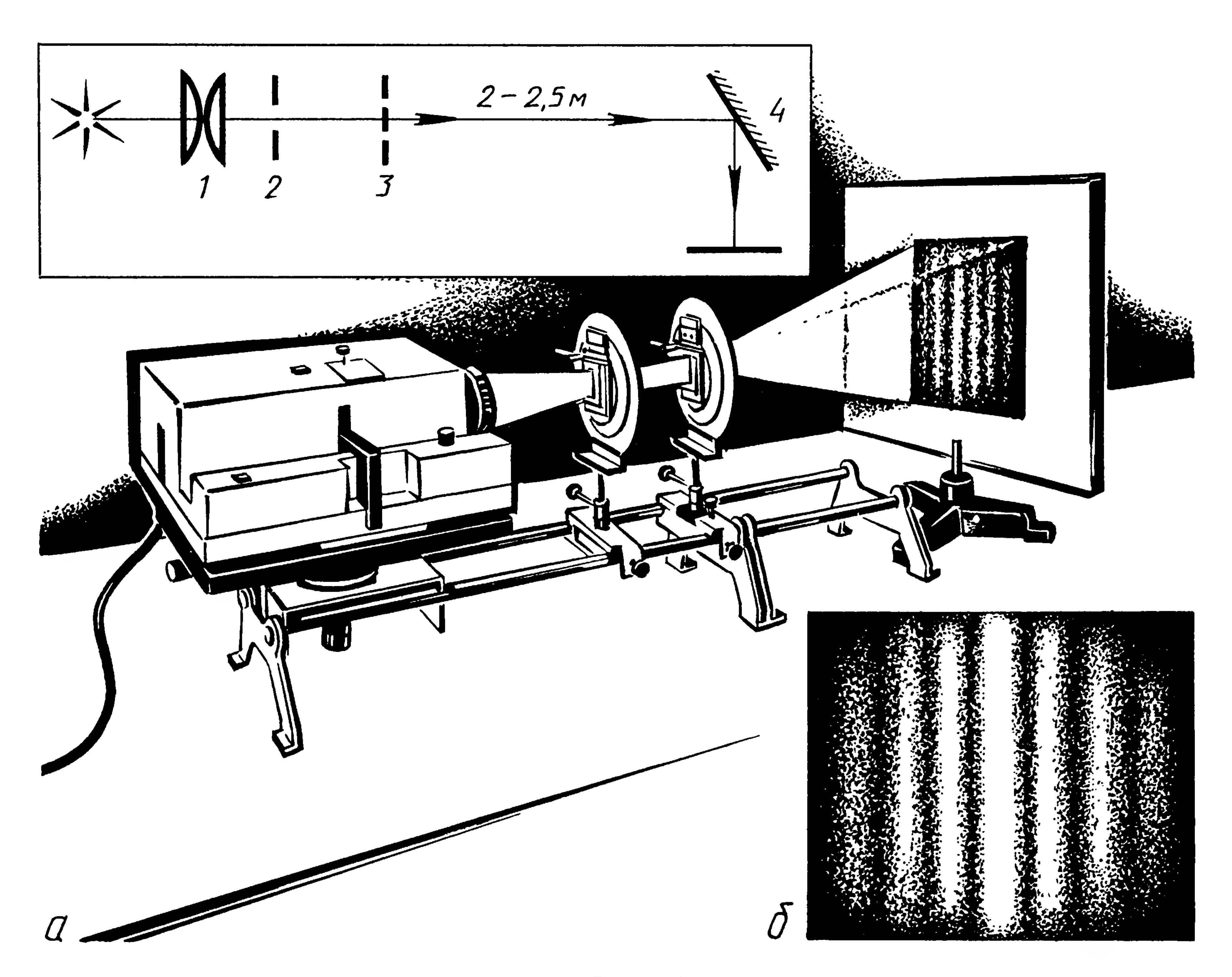


Рис. 136

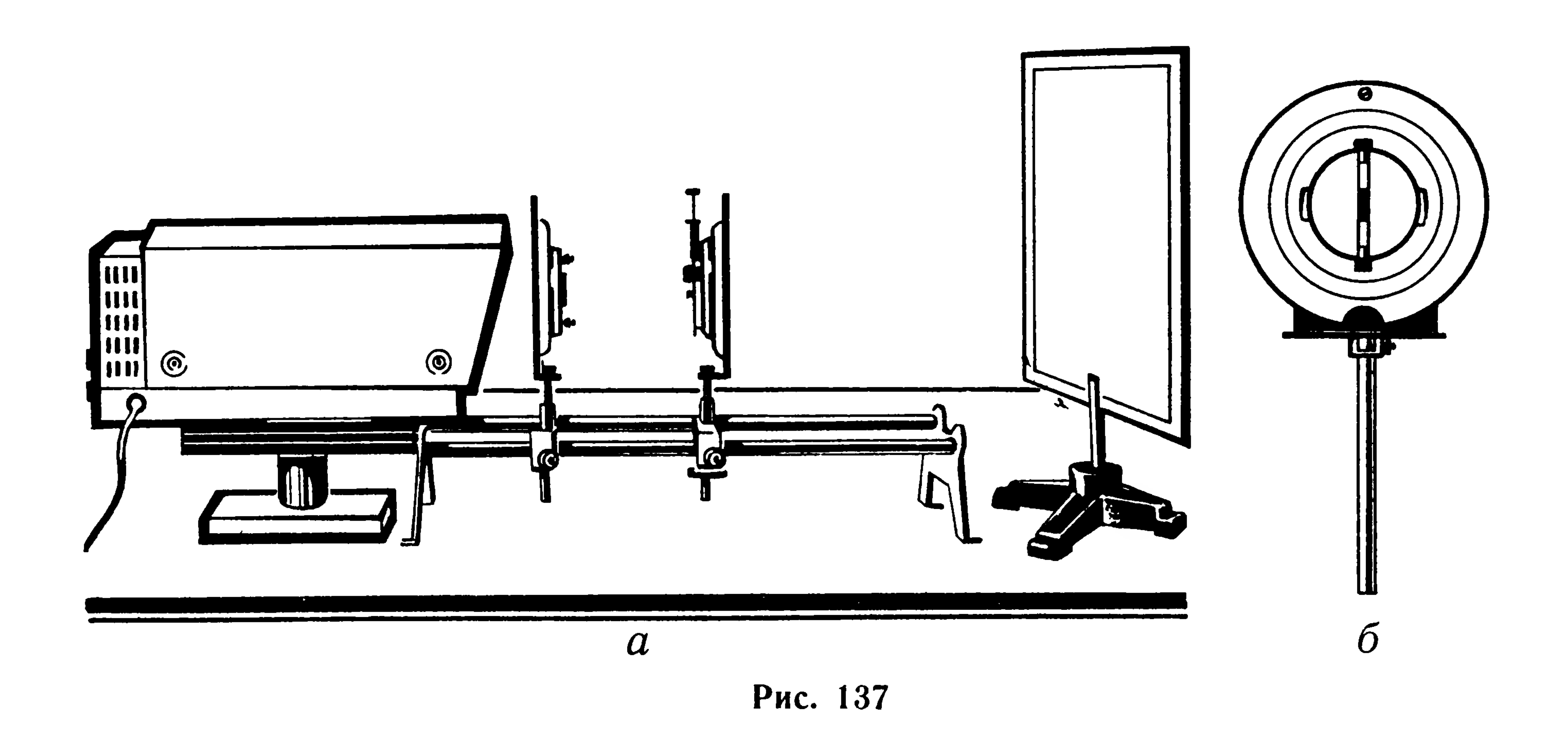


Рис. 137

Роль цилиндрической линзы может выполнить стеклянная палочка диаметром 4—5 мм (для лазера ЛГ-209) и длиной 45—47 мм. На концы стеклянной палочки (линзы) надевают самодельные наконечники, сделанные из любой тонкой металлической пластинки. Расстояние между отверстиями наконечников линзы должно быть равно расстоянию между винтами диска-ширмы. Готовую линзу закрепляют с помощью винтов на диск-ширму из набора по интерференции и дифракции света (рис. 137, *б*) и устанавливают на рейтер проекционного аппарата ФОС.

Конструкция диска-ширмы позволяет устанавливать линзу как вертикально, так и горизонтально. Для этого достаточно повернуть вокруг своей оси кольцо диска-ширмы. При вертикальном расположении линзы происходит расширение пучков в горизонтальной плоскости. Такие пучки нужны для демонстрации опытов по геометрической оптике.

Цилиндрическая короткофокусная линза позволяет одновременно расширить и растянуть по высоте пучок света лазера. Интерференционная картина представляет чередующиеся светлые и темные полосы.

Опыт 147. Интерференция света от зеркала Ллойда

Опыт с зеркалом Ллойда (см. § 19) отличается от предыдущих (опыты 144—146) тем, что интерференционная картина получается несимметричная относительно полосы, соответствующей центральной полосе. Сама полоса в опыте с зеркалом Ллойда темная. Это объясняется тем, что одни из когерентных пучков при отражении от зеркала теряет половину волны и лучи, идущие от источников *1* и *2*, приходят в противофазе. Демонстрацию опыта можно осуществить как с источником белого, так и монохроматического света.

А. Установка для наблюдения интерференционной картины с помощью зеркала Ллойда от источника белого света представ-

лена на рисунке 138. На оптическую скамью проекционного аппарата ФОС устанавливают диапроектор «Свитязь» без объектива. Вплотную к корпусу диапроектора устанавливают щель шириной примерно 0,3 мм параллельно плоскости зеркала. Непосредственно за щелью на рейтере, допускающем малые вертикальные и боковые перемещения, устанавливают столик с зеркалом на такой высоте, чтобы расходящийся от щели пучок лишь касался поверхности зеркала. Точной регулировки зеркала по высоте достигают с помощью винта рейтера для вертикальных перемещений. При этом на экране возникают две светлые горизонтальные полосы: одна полоса возникает от прямого света, идущего от щели (источник S_1), другая — от отраженного в зеркале (источник S_2). Затем зеркало медленно поворачивают вокруг горизонтальной оси с помощью винта настройки (см. рис. 138). Полосы при этом сближаются и накладываются друг на друга — возникает интерференционная картина, четкость которой зависит от угла падения света на зеркало: при больших углах падения света полосы интерференционной картины отчетливые, при уменьшении углов падения нечеткие и очень узкие. Для увеличения линейных размеров применяют наклонный экран.

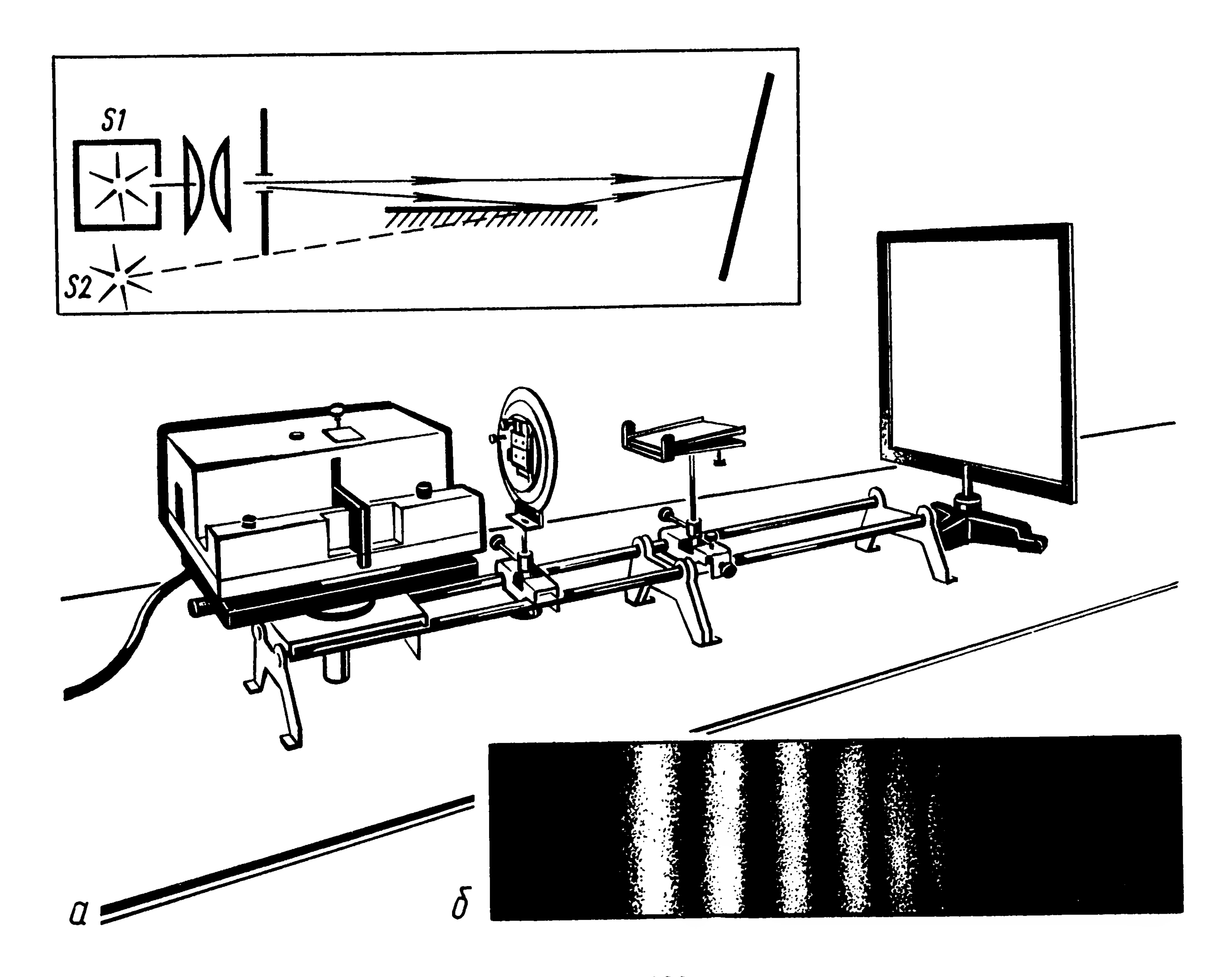


Рис. 138

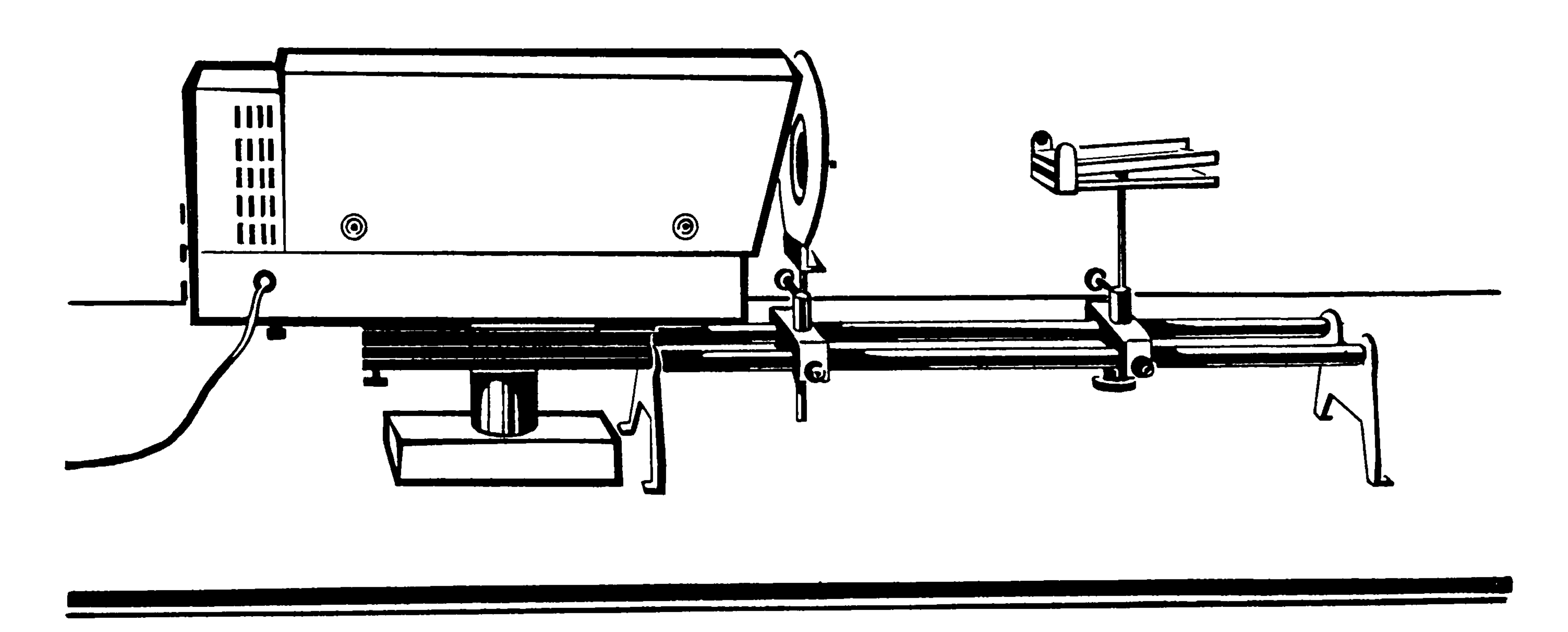


Рис. 139

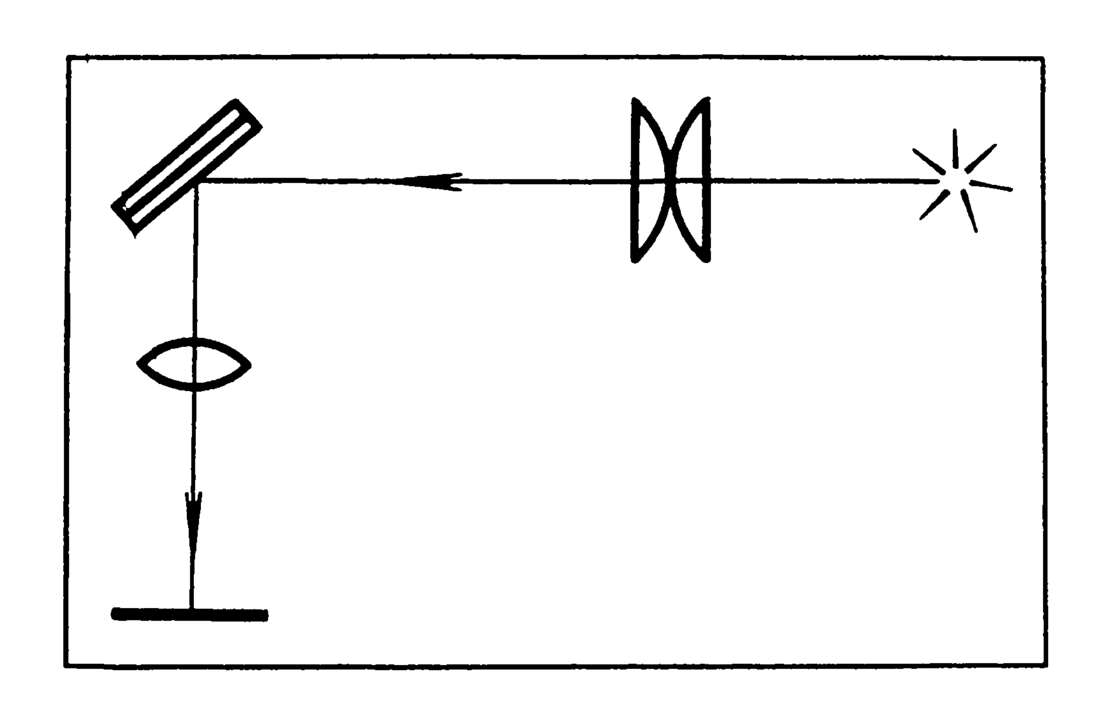
Б. Для наблюдения интерференционной картины с помощью зеркала Ллойда от монохроматического источника света собирают установку по рисунку 139. Источником монохроматического света является лазер. Для расширения пучка света применяют цилиндрическую линзу. Сравнивая интерференционные полосы данного и предыдущего опытов, обращают внимание учащихся на их различие и объясняют причины.

Опыт 148. Кольца Ньютона

Целью опыта является ознакомление учащихся с возникновением интерференции света в тонком слое воздуха между стеклянной пластиной и положенной на нее плоско-выпуклой линзой большого радиуса кривизны, с использованием этого явления для определения длины световой волны.

А. Сначала демонстрируют кольца Ньютона в отраженном монохроматическом свете лазера, для чего собирают установку (рис. 140). Прибор «Кольца Ньютона» располагают за короткофокусной линзой так, чтобы диаметр падающего на него пучка света был больше диаметра наблюдаемых интерференционных колец. Затем прибор поворачивают на угол 45° и на пути пучка отраженного света помещают объектив. Перемещая объектив вдоль пучка света, получают на экране четкое изображение интерференционных колец в отраженном свете.

Б. Располагая объектив в установке (см. рис. 140) за прибором «Кольца Ньютона» так, чтобы его оптическая ось совпала с оптической осью конденсора, демонстрируют кольца Ньютона в проходящем свете. Сравнивая интерференционные картины, полученные в отраженном и проходящем свете, поясняют причины их различия. Затем объясняют возможность определения длины световой волны с помощью интерференционных колец Ньютона. При этом пользуются таблицей «Кольца Ньютона».



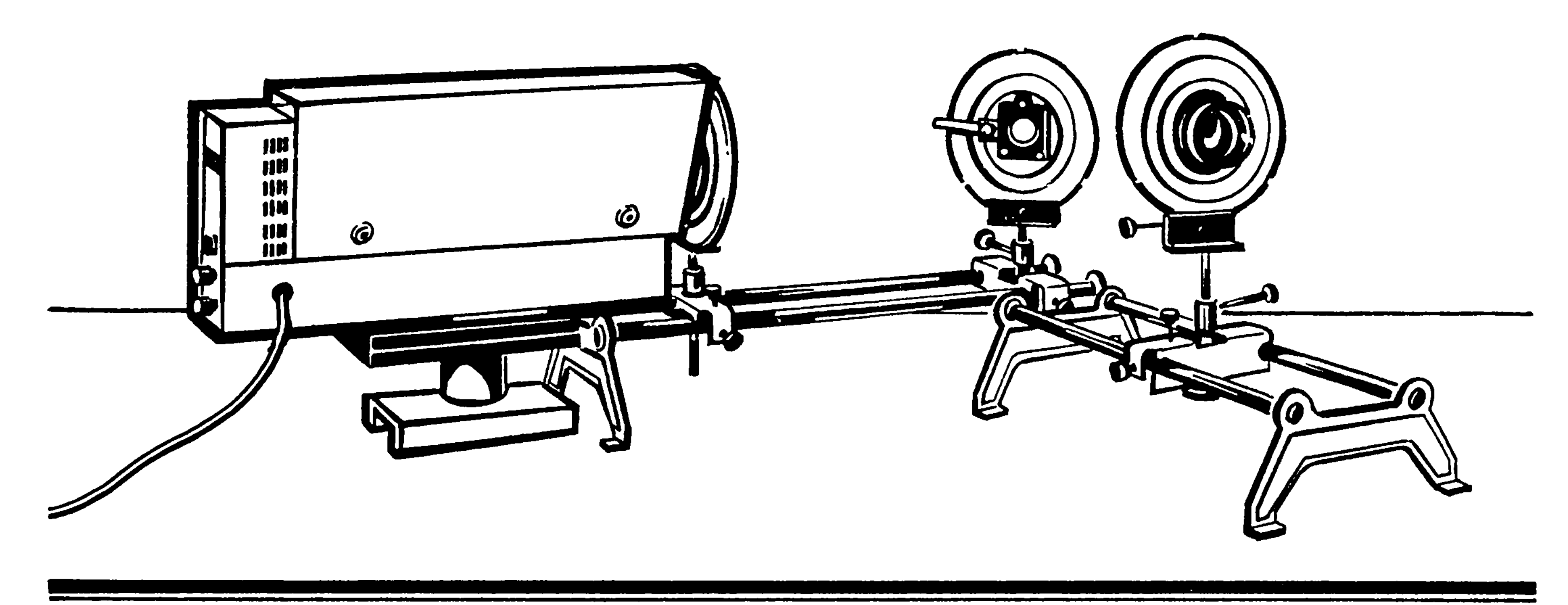


Рис. 140

В. Для демонстрации колец Ньютона в белом свете собирают установку по рисунку 141. На оптическую скамью проекционного аппарата устанавливают диапроектор «Свитязь», на расстоянии 10—12 см от него — диафрагму дисковую. На конце оптической скамьи под углом примерно 45° помещают прибор «Кольца Ньютона». Диаметр диафрагмы подбирают так, чтобы сечение пучка света было шире самого прибора. Установив объектив на пути отраженного от пластин прибора пучка света, демонстрируют кольца Ньютона. В зависимости от расстояния до экрана плавным перемещением объектива добиваются резкой интерференционной картины. В белом свете она представляет ряд концентрических радужных колец. Учащимся объясняют причины их возникновения.

Расположив объектив за прибором «Кольца Ньютона» так, чтобы его оптическая ось совпала с оптической осью конденсора, демонстрируют интерференционную картину в проходящем свете. В данном случае она представляет собой концентрические радужные кольца со светлым пятном в центре.

Опыты с кольцами Ньютона наиболее эффективны в отраженном свете, так как в этом случае видимость колец намного лучше. Для объяснения зависимости радиусов колец Ньютона одного порядка от длины волны необходимо провести демонстрацию с применением светофильтра, состоящего из двух частей разного цвета.

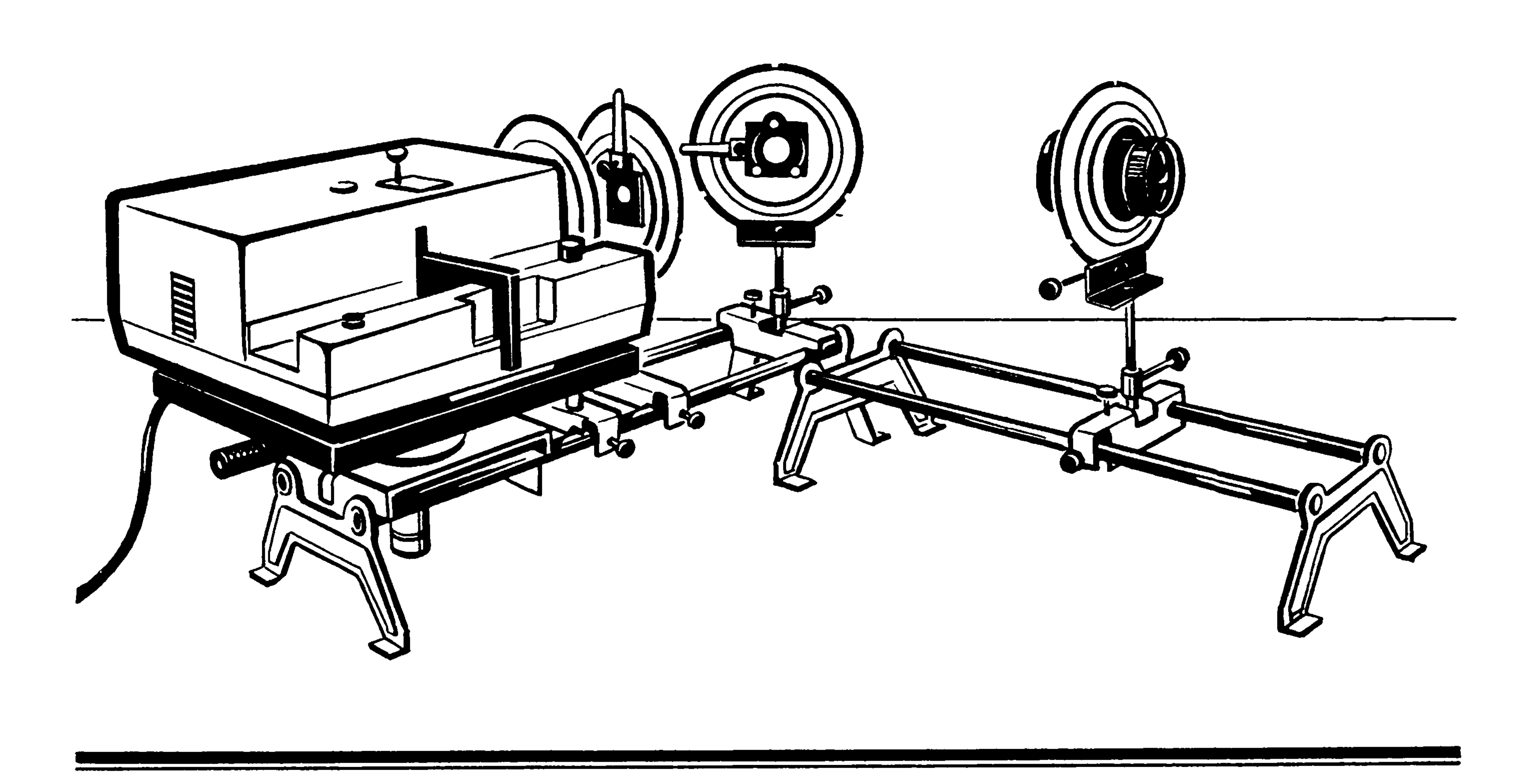


Рис. 141

Опыт 149. Интерференция света в тонких пленках

Целью опыта является ознакомление учащихся с явлениями интерференции, наблюдаемыми в природе.

А. На рисунке 142 приведена схема установки для демонстрации интерференционной картины с помощью тонкой мыльной пленки. Успешное проведение опыта зависит от качества применяемого раствора для получения пленки. Существует несколько простых способов его приготовления. Самыми простыми и доступными являются растворы стиральных порошков, кроме порошков с малым пенообразованием. Прочность пленки зависит от концентрации раствора. Можно взять 2—3%-ный раствор обычного хозяйственного мыла. Рекомендуется также использование 2,5%-ного раствора олеиновокислого натрия или калия в дистиллированной воде, нагретой до 60 °С.

Каркас для мыльной пленки помещают на пути света, идущего от диапроектора, под углом 45° к направлению его распространения так, чтобы отраженные от поверхности пленки лучи, проходя через объектив, падали на экран. Затем сосуд с мыльным раствором подносят снизу и погружают каркас в него. Сосуд убирают, при этом на каркасе образуется пленка. Плавно перемещая объектив, на экране получают четкое изображение пленки с яркими цветными интерференционными полосами. Ширина этих полос постепенно увеличивается. Учащимся объясняют возникновение интерференционных полос и постепенное их расширение.

Б. Роль прозрачной для света пленки может играть слой оксида металла, образующийся на поверхности металла при его нагревании. Для демонстрации интерференционных полос от слоя оксида на поверхности металла в собранной установке вместо каркаса с мыльной

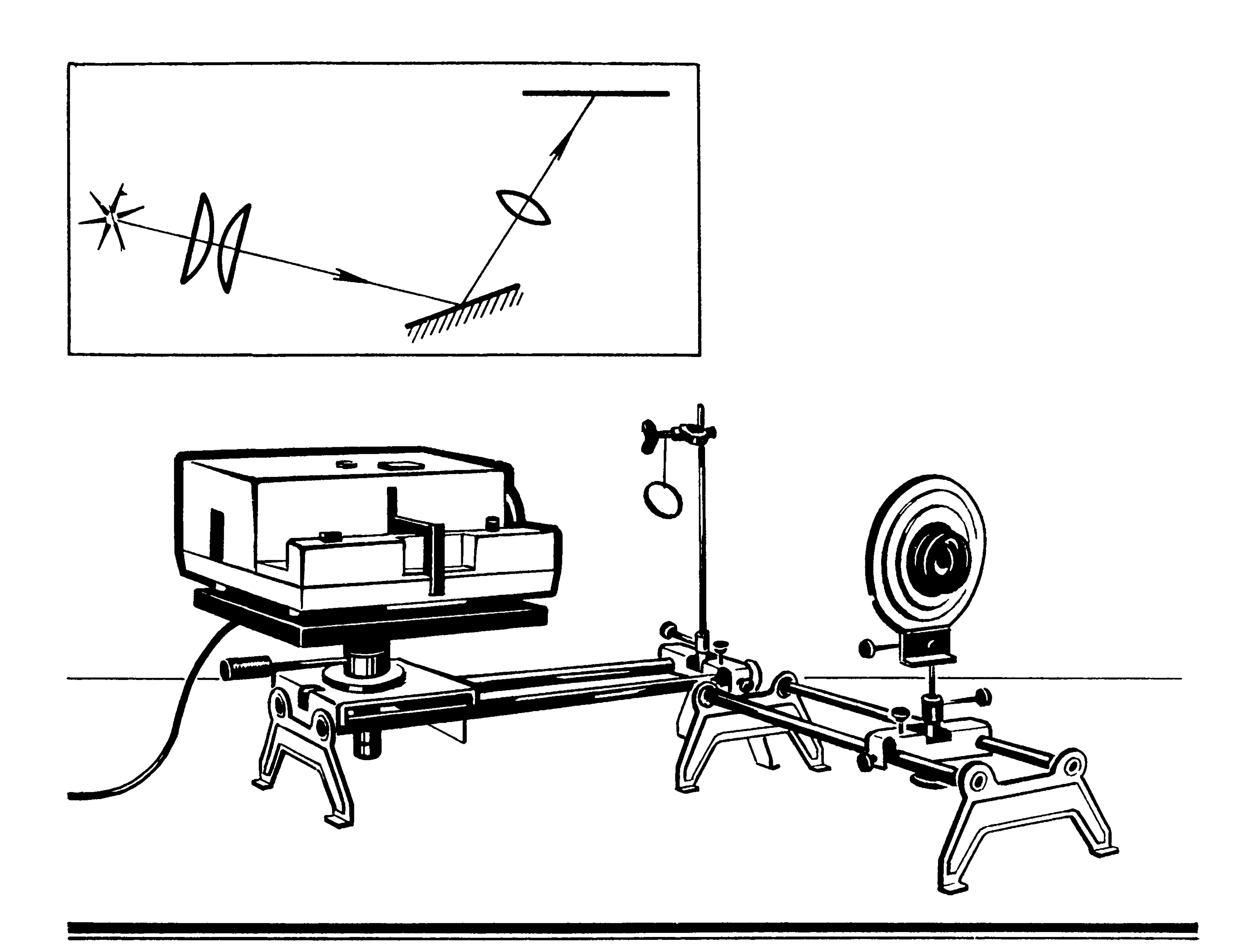


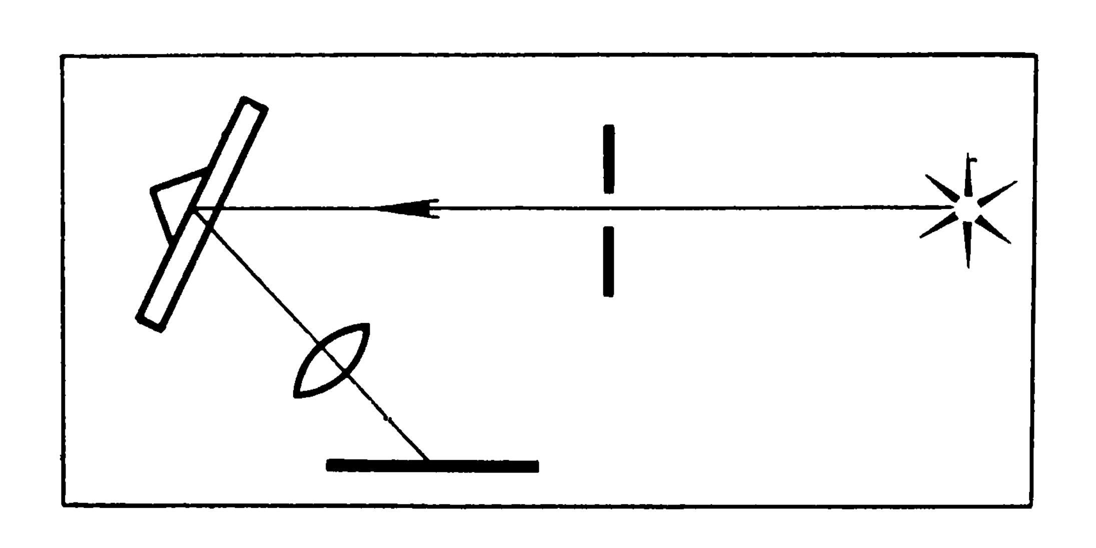
Рис. 142

пленкой под тем же углом к направлению распространения света устанавливают лезвие безопасной бритвы. При нагревании бритвы с помощью горящей спички на поверхности образуется слой оксида металла, а на экране появляются интерференционные полосы.

Опыт 150. Интерференция света в тонком воздушном клине

Целью опыта является ознакомление учащихся с возможностью практического использования явления интерференции света. Демонстрацию опыта можно проводить с использованием как лазера, так и обычного источника света.

А. Установка для демонстрации опыта с использованием лазера показана на рисунке 143. Вдоль оптической скамьи проекционного аппарата ФОС располагают лазер, короткофокусную линзу, прибор для демонстрации интерференции света в тонком воздушном клине под углом 45° к направлению распространения луча лазера. На пути света, отраженного от пластин прибора, помещают объектив, а на небольшом расстоянии от него — переносной экран. Затем короткофокусную линзу перемещают вдоль оптической скамьи, добиваясь получения на поверхности пластины освещенного круглого пятна. Перемещая объектив вдоль пучка лучей, отраженных от



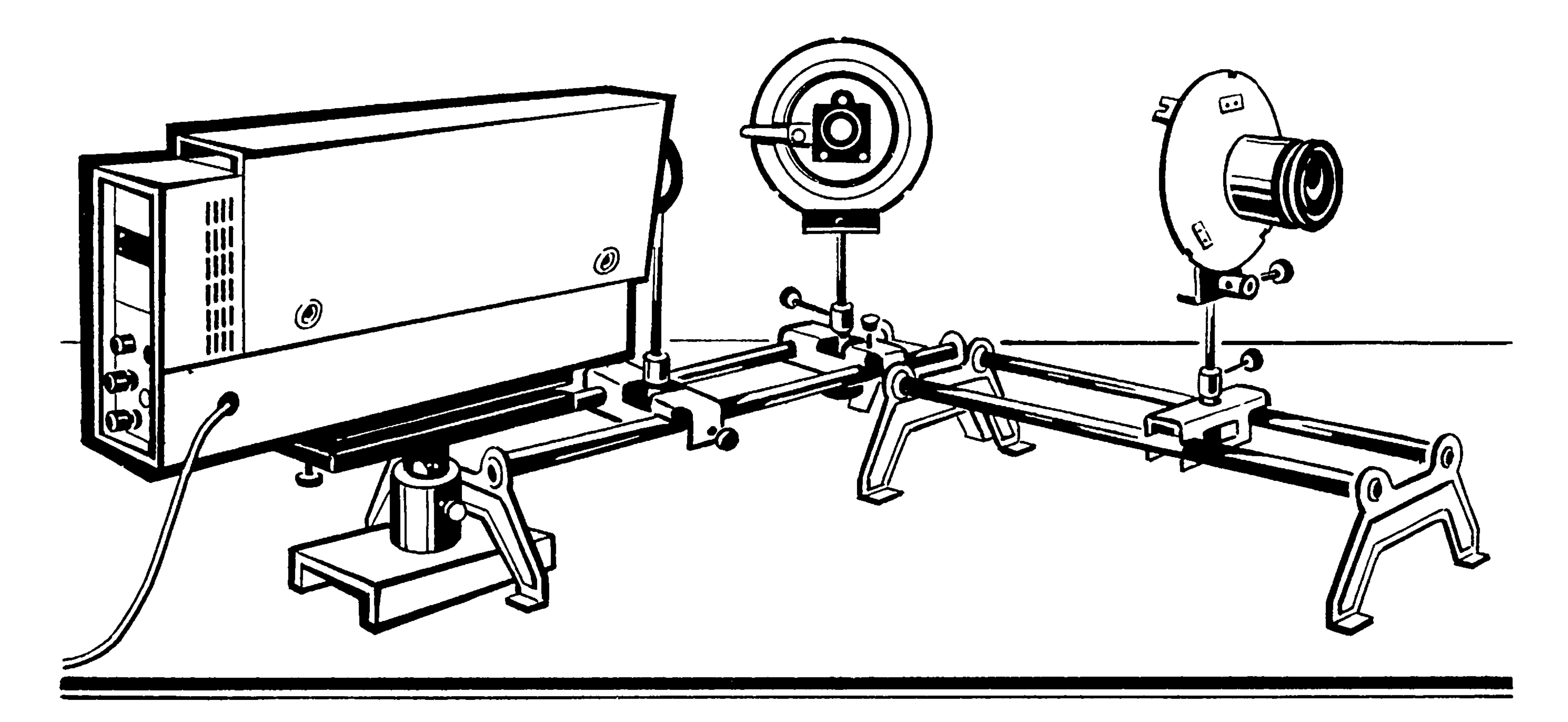


Рис. 143

пластин, получают на экране четкое изображение параллельных интерференционных полос (рис. 144). Затем опыт повторяют с другой парой пластин. Вместо пластины из зеркального стекла используют пластину из простого оконного стекла. При этом из-за неровности ее поверхности параллельность интерференционных полос нарушается. Это явление используется на практике для проверки качества шлифовки и полировки поверхностей различных деталей. Примерные рельефы поверхностей до шлифовки (*а*) и после нее (*б*) и соответствующие им интерференционные полосы показаны на рисунке 145.

Б. Для демонстрации интерференции белого света в тонком воздушном клине в установке предыдущего опыта вместо лазера используют диапроектор «Свитязь» (рис. 146). Для выделения узкого пучка света непосредственно за конденсором ставят диафрагму. Порядок проведения опыта остается тот же. Интерференционные полосы при этом получаются цветные.

Опыты 151—153. Бегущие волны

Опыты, описанные ниже, полезно использовать в классах с углубленным изучением физики и на факультативных занятиях. Перед объяснением соответствующего материала и демонстрацией опы-

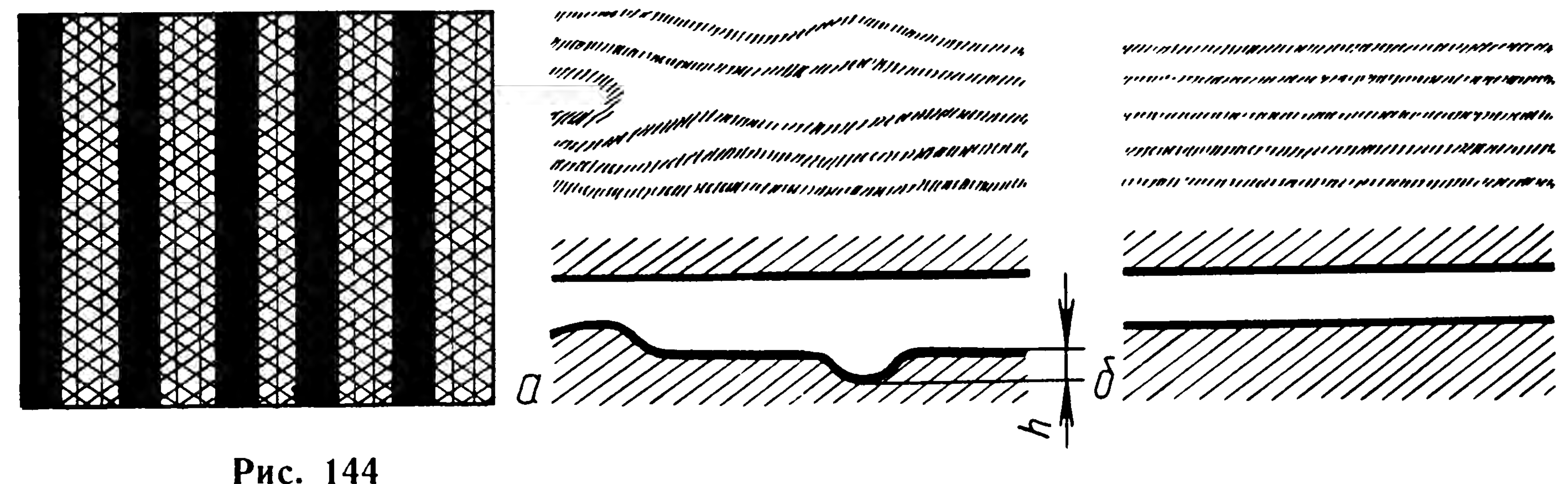


Рис. 144

Рис. 145

Рис. 146

Рис. 147

та учащимся можно задать вопросы: всегда ли наблюдается отражение волн от препятствий? Если не всегда, то когда? Обычно учащиеся догадываются и высказывают предположение, что отражения волн не будет, если среда, до которой доходит падающая волна, будет полностью поглощать переносимую волной энергию.

Приводят пример, подтверждающий высказанное предположение: волны на поверхности озера хорошо отражаются от скалистого берега и почти не отражаются от низкого заболоченного и поросшего тростником берега.

Наиболее наблюдательные сообщают, что в волновой ванне края сделаны пологими и к тому же оклеены грубым ворсистым сукном; благодаря этому не происходит отражения волн от бортов.

Чтобы подтвердить результаты наблюдений и высказываний учащихся, можно поставить два простых, но весьма поучительных опыта.

1. К потолочной балке прикрепляется специально приспо-

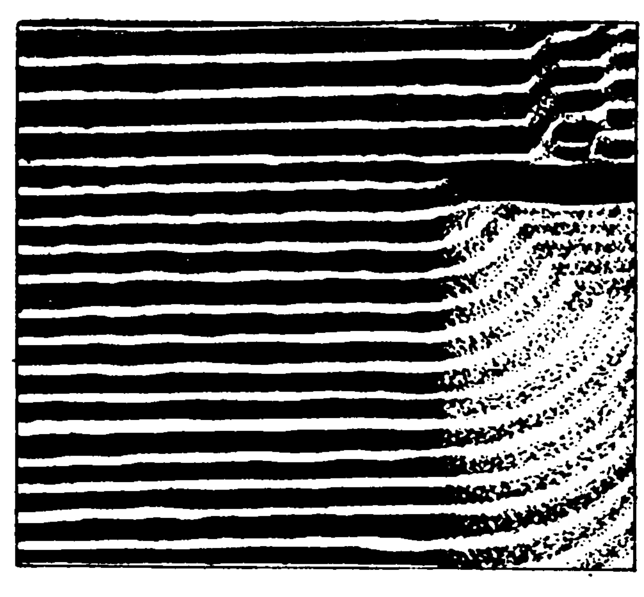
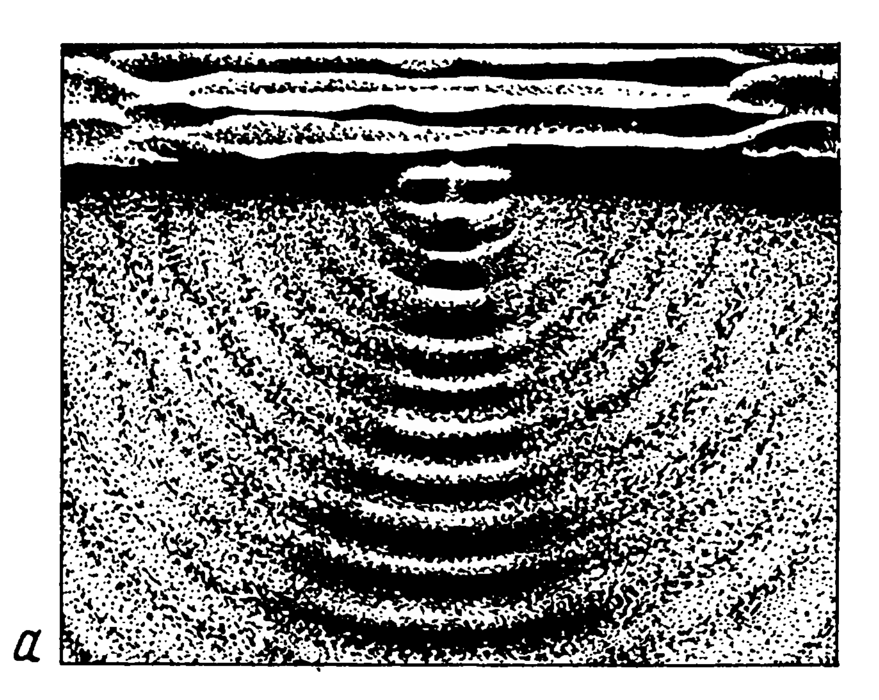


Рис. 148



а

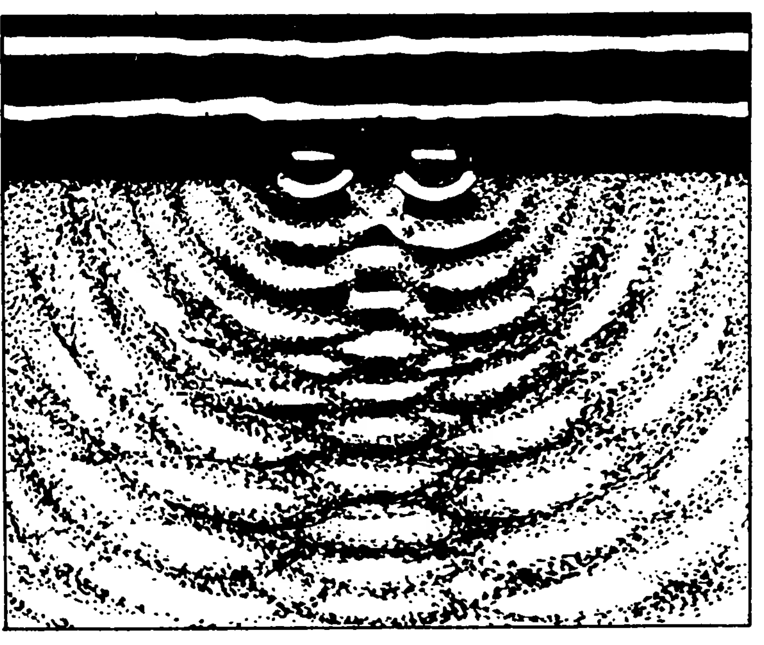
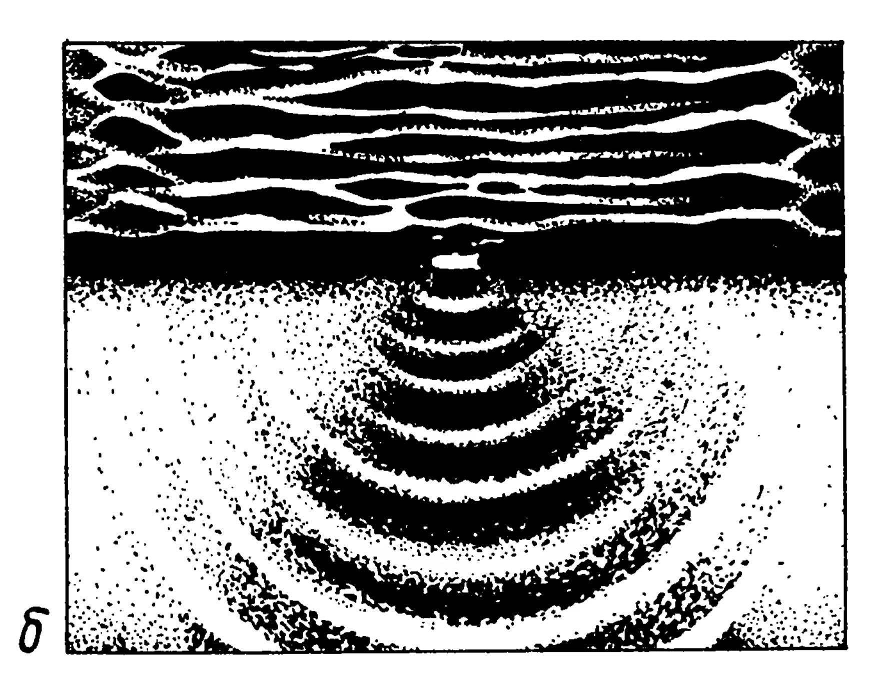


Рис. 150



б

Рис. 149

собленный для этого опыта блок, который можно жестко застопорить шпилькой *В*, а при необходимости (вынув шпильку *В*) плавно менять трение с помощью мягкого тормоза *Т* (рис. 147).

Перед уроком, включив вибратор, плавно изменяя трение блока о тормоз *Т*, добиваются, чтобы в шнуре не возникало отраженных волн, т. е. такого трения, при котором энергия падающей волны полностью поглощается блоком. Остановив блок и закрепив его шпилькой *В*, наблюдают отражение волн, что приводит к образованию стоячих волн.

На уроке демонстрация идет в обратной последовательности: сначала демонстрируют стоячие волны в шнуре, а затем, остановив вибратор, с помощью указки вынимают шпильку *В* и демонстрируют, что в шнуре не образуются стоячие волны, а есть только бегущие волны.

2. С генератором дециметровых волн индуктивно связывают разомкнутую длинную линию, настроенную в резонанс с генератором (см. рис. 101). Используя в качестве индикатора неоновую лампочку, обнаруживают в линии стоячие волны напряжения. На конце линии образуется пучность напряжения. Следовательно, отражение происходит без потери полуволны.

Замыкают линию накоротко. Вновь в линии обнаруживаются стоячие волны, но на конце линии в этом случае обнаруживается узел напряжения. Следовательно, отражение происходит с потерей полуволны.

3. Разомкнув линию, подключают к ней электрическую ламку ЛН, рассчитанную на 2,5 В, 0,03 А, сопротивление которой близко к волновому сопротивлению линии. Включив генератор, наблюдают яркое свечение лампы. Попытка обнаружить стоячие волны в линии оказывается неудачной. Опыт свидетельствует о полной (разумеется, в пределах точности его контрольного индикатора — неоновой лампы) передаче энергии волн лампе накаливания.

В заключение весьма полезно показать фрагмент из кинофильма «Физические основы радио», в котором показаны бегущие волны в длинной линии.

Сообщают учащимся, что линия, в которой вся подводимая к ней энергия поглощается присоединенной на конце нагрузкой, называется согласованной с нагрузкой. В согласованной линии есть только бегущая волна ($\cos\varphi = 1$).

Опыты 154—156. Дифракция волн

В связи с тем, что установки для демонстрации явления дифракции достаточно сложны, следует демонстрацию опытов по дифракции волн начать с опытов по дифракции поверхностных волн. Они весьма наглядны. Затем показать все опыты со звуковыми волнами и, наконец, все опыты с электромагнитными волнами. Разумеется, делать это следует не на одном уроке, а на двух или трех уроках. Причем две последующие серии опытов практически только закрепляют и углубляют то, что учащиеся узнали на первом уроке.

1. Для демонстрации явления дифракции поверхностных волн собирают установку, изображенную на рисунке 86. Установку лучше собрать со стробоскопическим диском. Это позволит получить наиболее выразительные картины опытов на экране.

На дно ванны помещают препятствие, закрывающее примерно половину ванны. С помощью точечного вибратора возбуждают концентрические волны. Изменяя частоту колебаний вибратора, добиваются четкой картины огибания препятствия.

Заменяют точечный вибратор плоским и повторяют опыт. На экране получается картина, изображенная на рисунке 148. Учащиеся видят, что и в этом случае волны огибают препятствие.

Далее образуют щель из двух препятствий, помещаемых на дне волновой ванны шириной примерно 10—12 см. Включив вибратор, наблюдают дифракционную картину. Уменьшают размер щели до 5—6 см и замечают, что и дифракционная картина становится более отчетливой (рис. 149).

На дно ванны помещают массивное препятствие длиной 10—12 см. Возбуждают плоские волны и наблюдают дифракцию у обоих краев препятствия. Отчетливо видно, что дифракционные волны интерферируют друг с другом. Обращают внимание учащихся на то, что в центре тени просматривается интерференционный максимум. Уменьшают размеры препятствия примерно вдвое. Интерференционная картина становится заметнее, а тень — более размытой.

Наконец, образуют на дне ванны из препятствий две щели,

ширина которых примерно 2—3 см. Такую же примерно ширину имеет и разделяющее их препятствие. Включив вибратор с плоской насадкой, наблюдают, что волны, проходящие через щели, интерферируют, образуя отчетливые интерференционные максимумы и минимумы (рис. 150).

Если создать на дне ванны дифракционную решетку из четырех щелей и повторить опыт, то можно будет получить более четкую дифракционную картину.

2. Для демонстрации дифракции звуковых волн лучше всего воспользоваться длинами волн порядка 3—5 см (частота 10—6 кГц). При таких длинах волн демонстрационные установки получаются достаточно компактными; диаграмма направленности используемых в школе громкоговорителей и микрофонов становится достаточно остронаправленной, что обеспечивает достаточную выразительность опытов.

Установка для демонстрации дифракции звуковых волн показана на рисунке 151. Расстояние от громкоговорителя до микрофона равно приблизительно 1—1,5 м. Микрофон лучше взять остронаправленный с полосой частот до 10 кГц. Удаются опыты и с микрофоном типа МД-55, но в этом случае частоту звуковых колебаний не следует брать выше 8 кГц, так как его полоса частот лежит в пределах от 60 до 800 Гц.

На расстоянии 30—40 см от громкоговорителя ставят сначала один экран. Включают установку и убеждаются в том, что она действует. Медленно передвигают микрофон за край экрана и замечают, что звуковые волны обнаруживаются и там.

Затем ставят второй экран так (рис. 152), чтобы образовалась щель шириной 6—8 см. Включают установку и медленно передвигают

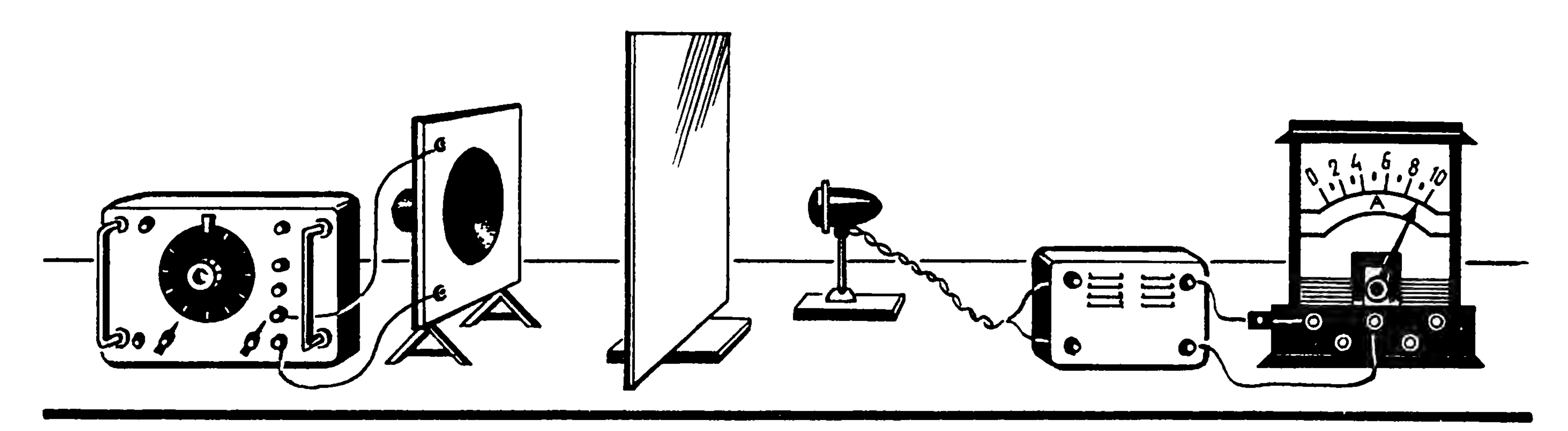


Рис. 151

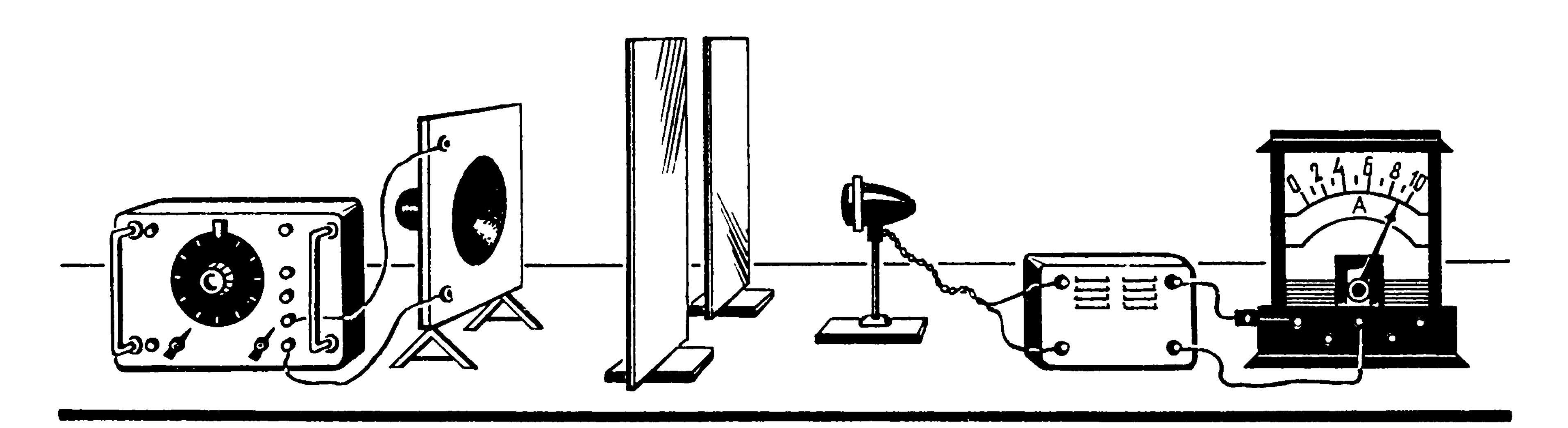


Рис. 152

микрофон около щели по дуге окружности радиусом 40—50 см. Обнаруживают широкий центральный максимум и по одному слабому побочному максимуму. Если опыт хорошо отработан, можно обнаружить и вторые побочные максимумы, но их амплитуда очень мала (порядка одной десятой от амплитуды основного максимума) и для их обнаружения надо увеличить усиление принимаемого сигнала.

Уменьшают ширину щели так, чтобы она стала сравнимой с длиной волны, и замечают, что побочные максимумы исчезли, а интенсивность центрального максимума постепенно убывает.

Полезно зарисовать схематические диаграммы наблюдаемого явления (рис. 153).

Собирают дифракционную решетку из двух щелей шириной примерно 2λ и такой же по ширине непрозрачной пластины.

Перемещая за решеткой микрофон, обнаруживают узкий, но интенсивный центральный максимум и по 2—3 побочных максимума с обеих сторон. Анализируя результаты опыта, зарисовывают схему распределения интенсивности.

Опыт повторяют с дифракционной решеткой из четырех щелей. Убеждаются, что в этом случае интерференционные максимумы и минимумы выражены четче. Если вместо дифракционной решетки установить алюминиевый диск диаметром примерно 15 см, можно обнаружить, что за ним по осевой линии звук прослушивается. Однако при перемещении микрофона вверх или вниз, вправо или влево выявляется область отсутствия звуковых волн. Следует начертить схему распределения интенсивности звукового поля за диском. Она напоминает дифракционную картину от одиночной щели.

3. Для демонстрации дифракции электромагнитных волн используют комплект приборов СВЧ. Установка для демонстрации опытов показана на рисунке 154. Расстояние между генератором и приемником берут около одного метра. Препятствия ставят посредине.

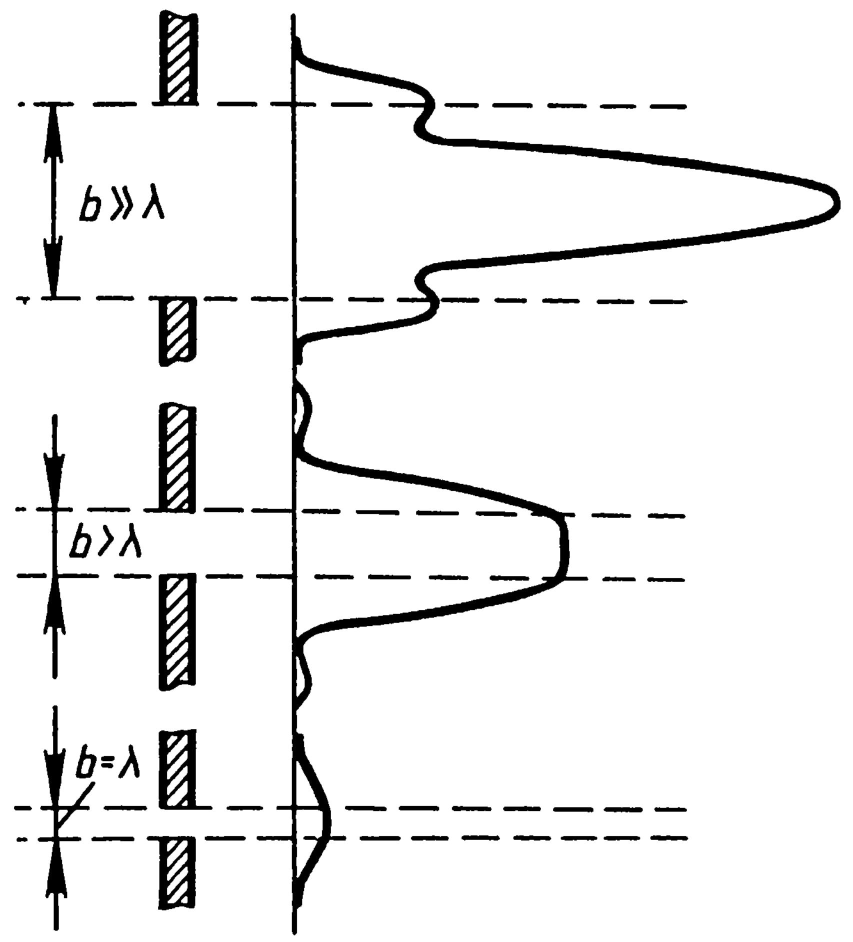


Рис. 153

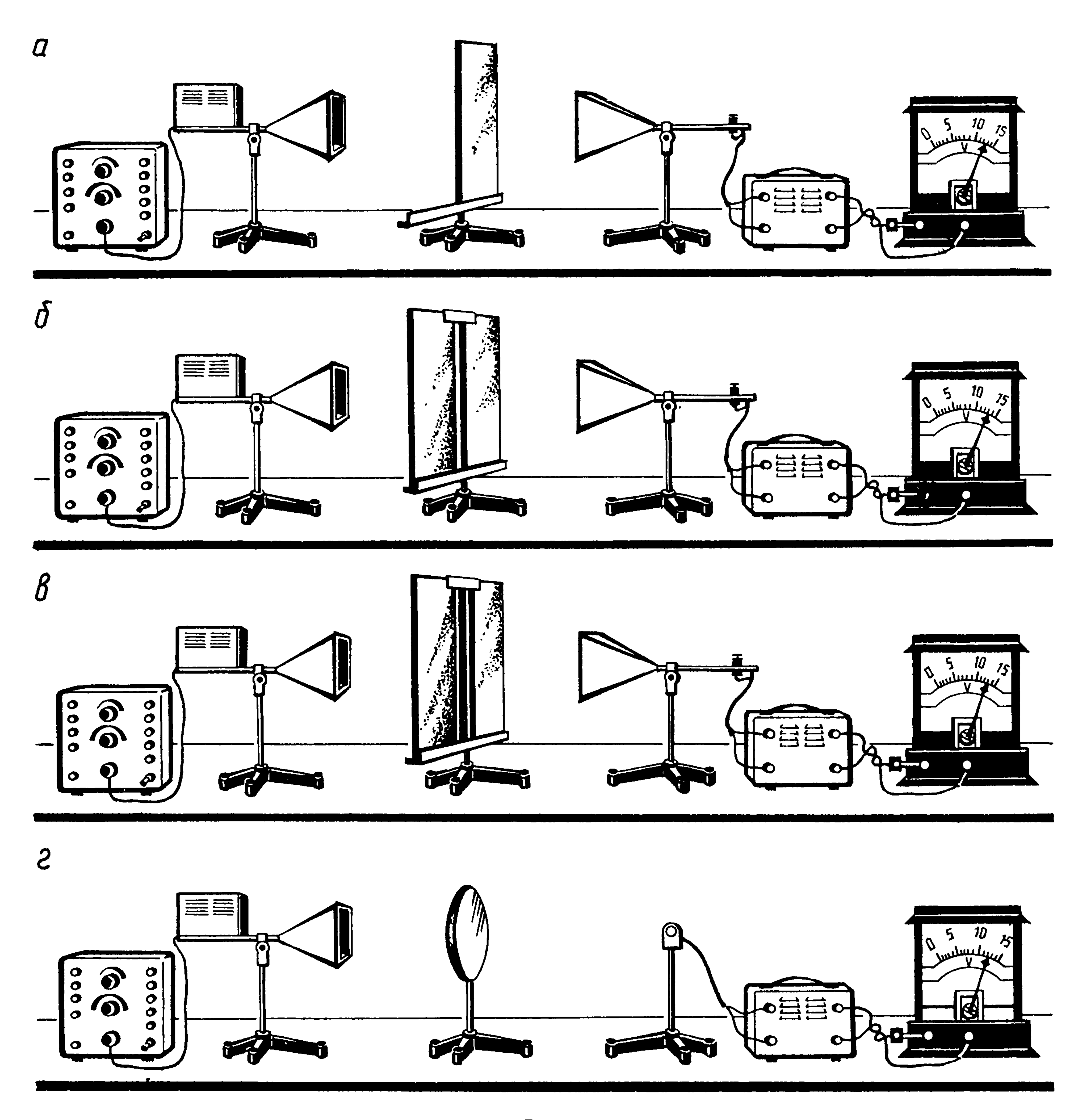


Рис. 154

Сначала в пространство между излучающей и приемной антенной вносят один алюминиевый экран (рис. 154, *а*). Помещая приемную антенну за экраном, обнаруживают электромагнитные волны за его краем. Это значит, что электромагнитные волны дифрагируют.

Затем ставят второй экран так, чтобы между обоими экранами образовалась щель шириной 4—5 см (рис. 154, *б*). Передвигая за щелью приемную антенну по дуге окружности, центр которой находится посредине щели, обнаруживают центральный и один-два побочных максимума с каждой стороны (ось приемной антенны должна совпадать с направлением радиуса окружности).

Опыт повторяют с дифракционной решеткой из двух щелей, сделанной из металлических пластин (рис. 154, *в*). Обнаруживают,

что в этом случае побочные максимумы выражены значительно четче, чем в опыте с одной щелью.

Наконец, на пути электромагнитных волн ставят алюминиевый диск и с помощью дипольного приемника (рис. 154, *г*) обнаруживают интерференционный максимум в центре тени, которую должен был отбрасывать диск.

Проделанные опыты убеждают учащихся в том, что дифракция является общим свойством всех волн и что явление дифракции всегда сопровождается интерференцией дифрагирующих волн.

Опыты 157—158. Дифракция света на тонкой нити

1. Установка для проведения опыта приведена на рисунке 155. Оптическую скамью с установленным на ней лазером располагают вдоль демонстрационного стола. На пути пучка света лазера помещают короткофокусную линзу. При этом расширенный пучок света падает на рамку с натянутой строго вертикально тонкой нитью. При диаметре нити, примерно равном 0,05 мм, на экране получается четкая дифракционная картина. Между двумя темными полосами в центре хорошо просматривается светлая полоса. По ту и другую сторону от темных полос наблюдается система чередующихся темных и светлых полос. При увеличении расстояния до экрана размеры всей картины растут.

2. Последовательно располагая на оптическую скамью диапроектор «Свитязь», раздвижную щель, нить на рамке так, как показано на рисунке 156, получают резкое изображение щели на экране. Для этого в отсутствие нити перемещают щель относительно диапроектора. Затем на расстоянии 15—20 см от щели помещают рамку с тонкой нитью. Расположение раздвижной щели и рамки с тонкой нитью на вращающихся дисках-ширмах позволяет соблюдать параллельность щели и нити. Постепенно суживая щель, на экране получают дифракционные полосы в виде темных и светлых

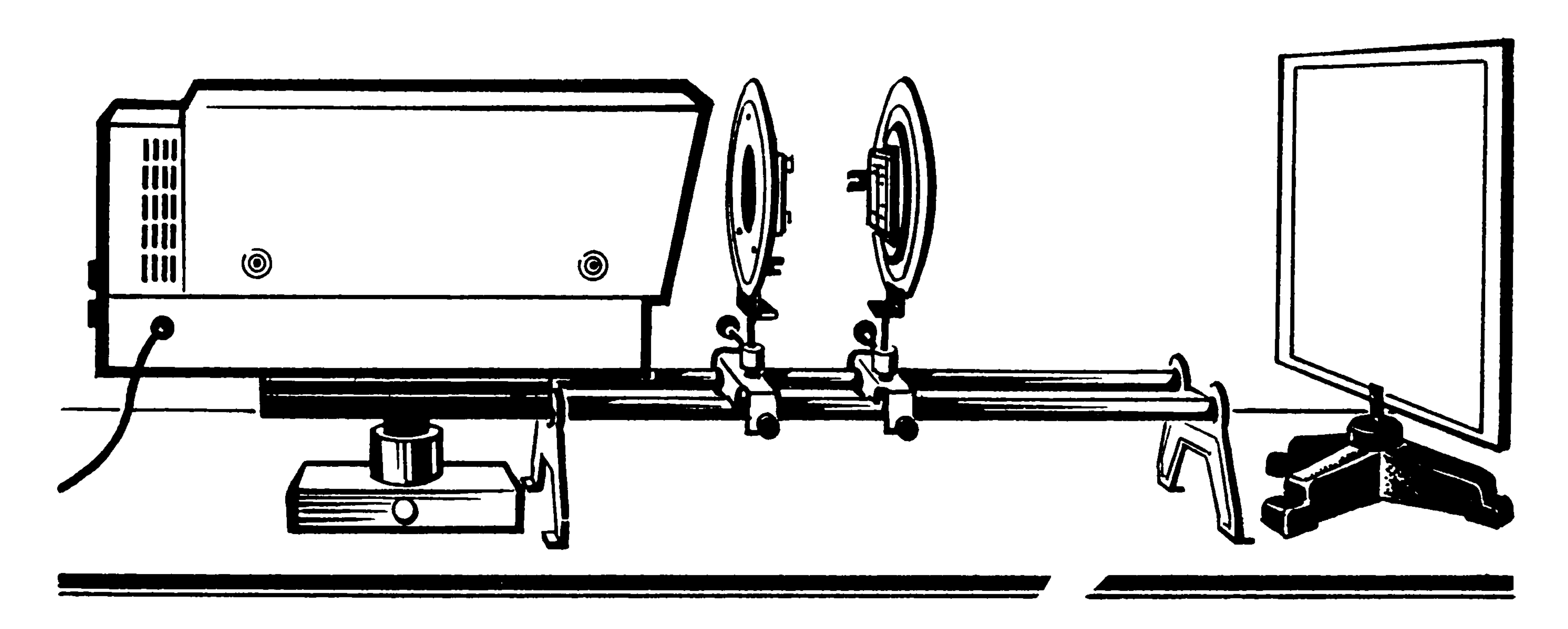


Рис. 155

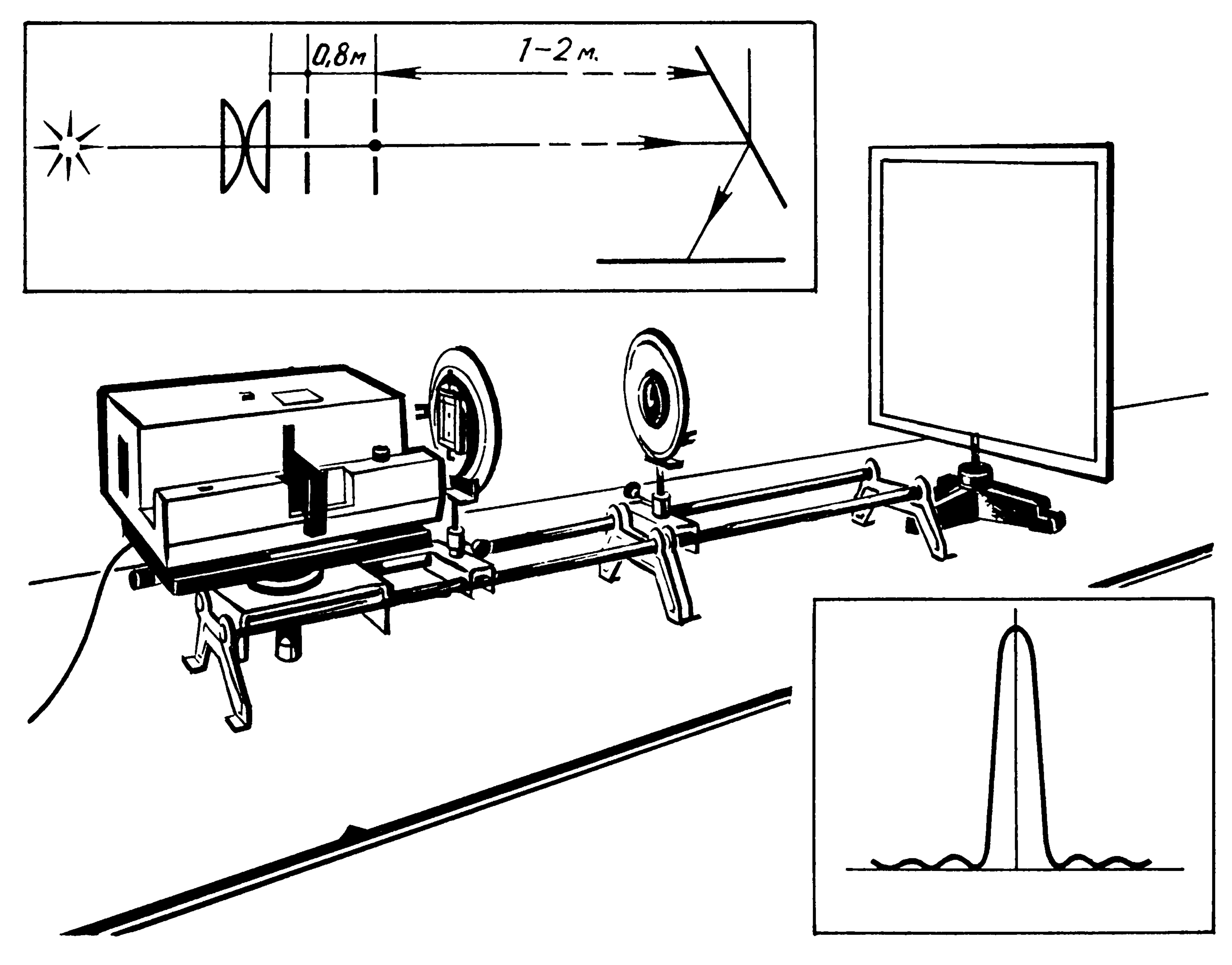


Рис. 156

полос в области геометрической тени и радужных полос по обе стороны от нее. В центре геометрической тени наблюдается светлая полоса. Учащимся нужно объяснить причину такого явления, обратив их внимание на график распределения яркости полос дифракционного спектра.

Опыты 159—160. Дифракция света на щели

Дифракцию от одной щели можно наблюдать как при обычном узком пучке света лазера, так и расширенном.

1. Для демонстрации опыта с расширенным пучком лазера собирают установку по рисунку 157. На оптическую скамью располагают лазер, короткофокусную линзу, раздвижную щель. На расстоянии 1,5 м располагают экран. Затем также медленным вращением винта уменьшают ширину раздвижной щели и наблюдают дифракционную картину на экране.

2. Собирают установку по рисунку 158. Оптическую скамью с установленным на ней диапроектором «Свитязь» располагают вдоль демонстрационного стола. На расстоянии 10—15 см от диапроектора устанавливают раздвижную щель, закрепленную в диске-

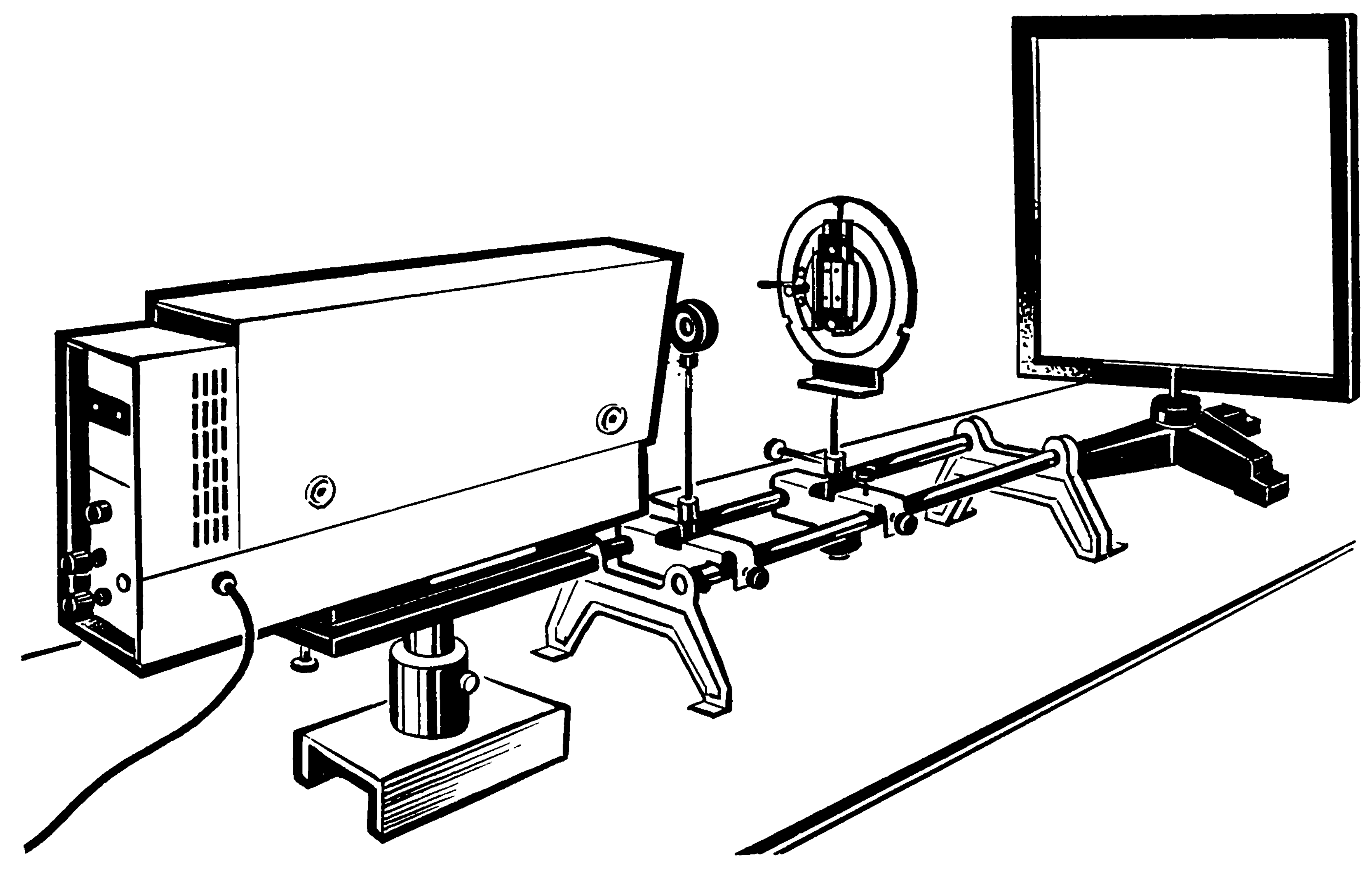


Рис. 157

10

15

200

Рис. 158

ширме. Поворачивая диск-ширму, щель устанавливают вертикально. С помощью винта оставляют ширину щели приблизительно 0,2 мм. Параллельно первой щели на расстоянии 15—20 см от нее располагают вторую щель и устанавливают ширину примерно 1—2 мм. На расстоянии 1,5—2 м от второй щели располагают экран. На экране появляется изображение первой щели в виде светлой полосы. Медленно вращая винт второй раздвижной щели, плавно уменьшают ее ширину и наблюдают за появившейся дифракционной картиной, которая представляет цветные полосы по обе стороны и светлую в центре. Надо иметь в виду, что при сильном уменьшении второй щели дифракционные полосы расширяются, но их яркость уменьшается. Поэтому наилучшая видимость дифракционных полос получается при не слишком узкой второй щели, когда полосы расположены довольно часто, но зато яркость их больше. Для увеличения видимости дифракционных полос достаточно их раздвинуть, увеличивая угол наклона экрана к оптической оси диапроектора.

Применяя метод Гюйгенса — Френеля, с помощью рисунка на доске объясняют учащимся образование дифракционных полос.

Опыты 161—162. Получение дифракционного спектра

1. Для демонстрации дифракционных спектров монохроматического света собирают установку по рисунку 159. На оптическую скамью располагают лазер, в непосредственной близости от него — короткофокусную линзу, на расстоянии 10—15 см от нее в верти-

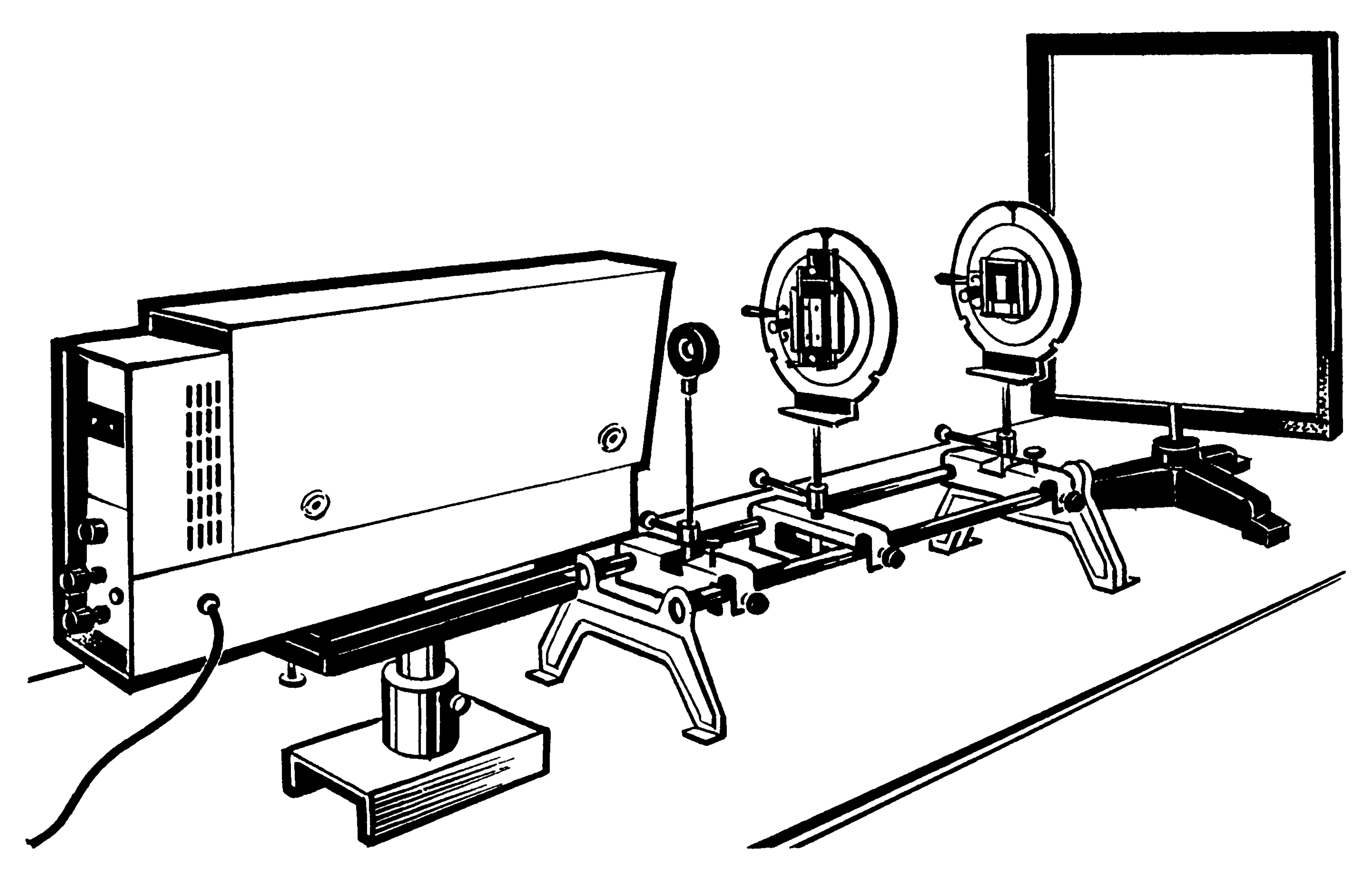


Рис. 159

кальном направлении — раздвижную щель. Получив на экране резкое изображение щели, устанавливают за ней дифракционную решетку. На экране получается ряд красных полос (луч лазера красный), симметрично расположенных относительно центральной полосы (спектра нулевого порядка).

Далее для случая нормального падения на решетку плоской волны объясняют действие дифракционной решетки и выводят формулу для главных максимумов:

$$k\lambda = d \sin \varphi,$$

где d — постоянная решетки; φ — угол дифракции; k — постоянная спектра; λ — длина волны.

Затем учащимся показывают, каким образом в опыте с дифракционной решеткой можно измерить длину световой волны.

2. Для получения спектра света, испускаемого нитью электрической лампы, собирают установку, изображенную на рисунке 160. Вертикальная раздвижная щель *2* шириной 0,5—1 мм с помощью объектива *4* проецируется на просветный экран. Затем непосредственно за объективом устанавливают дифракционную решетку *5*. На экране получают дифракционную картину, состоящую из белой полосы в середине (центральный максимум) и ряда спектров, сим-

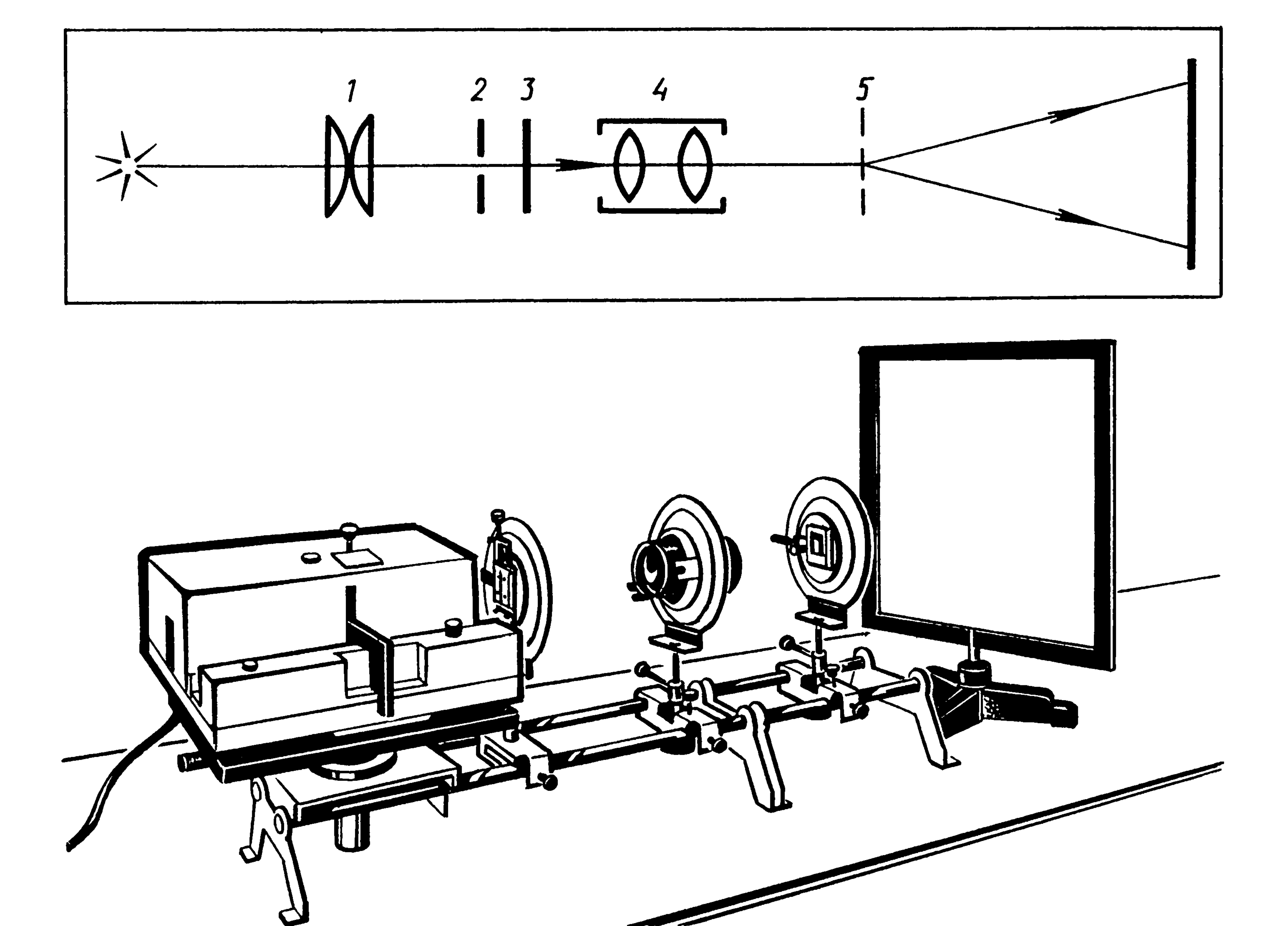


Рис. 160

метрично расположенных справа и слева от нее. По мере удаления от центра спектры становятся более широкими, но менее яркими. Эти спектры носят название спектров первого, второго, третьего и т. д. порядков (рис. 161). В каждой боковой светлой полосе параллельно друг другу располагаются полосы, цвет которых постепенно и непрерывно меняется от фиолетового до красного. На ближайших к центральной светлой полосе края спектров получаются фиолетовые полосы, а на дальних — красные.

Нужно обратить внимание учащихся на то, что в дифракционных спектрах расстояния цветовых полос от центрального максимума пропорциональны длинам волн. Это позволяет наиболее точно определить длину световой волны для каждого цвета.

Опыт 163. Определение длин световых волн

Описанный выше опыт по наблюдению дифракционного спектра необходимо использовать для определения длин световых волн. Для этого опыт целесообразно повторить несколько в иной форме. Установка с проекционным аппаратом располагается на демонстрационном столе, а спектр — на противоположной стене аудитории (рис. 162).

Измерив расстояние l от решетки до экрана (8—10 м) и расстояние x от середины центральной светлой полосы до середины каждой из цветных полос, можно с большой (для классной демонстрации) точностью определить длины волн основных спектральных линий. Опыт важен с точки зрения ознакомления учащихся с экспериментальными методами физики и с воспитательной точки зрения.

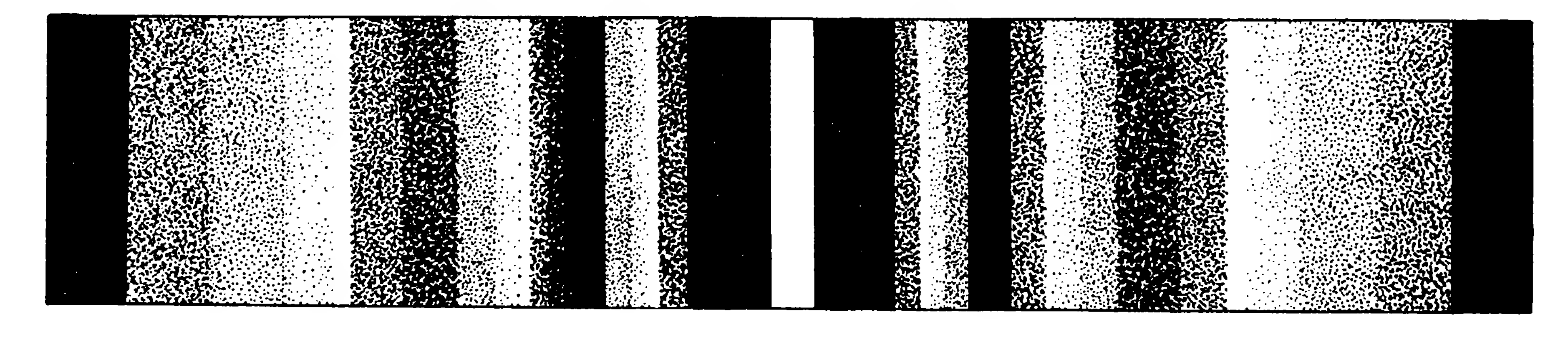


Рис. 161

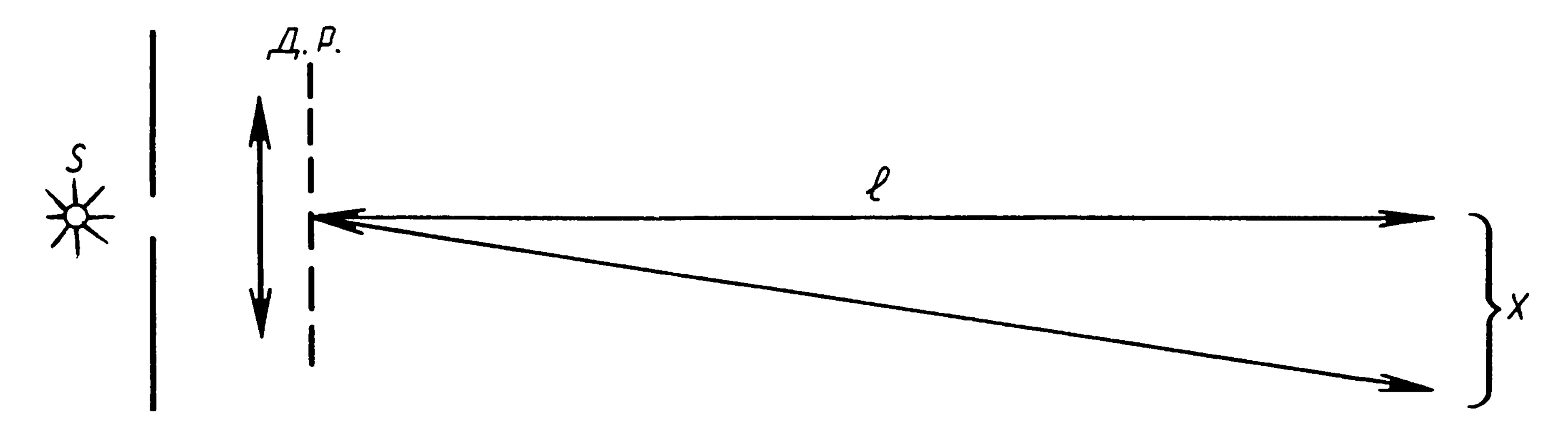


Рис. 162

Опыты 164—166. Поляризация волн

1. Для демонстрации поляризации электромагнитных волн собирают установку, изображенную на рисунке 163. Включив выпрямитель и усилитель, обнаруживают, что установка работает. Вносят поляризационную решетку так, чтобы ее стержни были расположены горизонтально. Прием не прекращается. Но приемник теперь принимает поляризованные волны (учащимся здесь не следует объяснять, что генератор сам дает поляризованные волны). Вносят анализатор и, поворачивая его, обнаруживают, что при взаимно перпендикулярном расположении стержней анализатора и поляризатора прием электромагнитных волн прекращается. Это и подтверждает, что электромагнитные волны поляризуются.

2. Убрав поляризатор, повторяют опыт и обнаруживают, что при вертикальном расположении стержней анализатора прием прекращается. Делают вывод, что электромагнитные волны, излучаемые генератором СВЧ, поляризованы. Объясняют причину поляризации и вычерчивают график напряженности электрического поля и график магнитной индукции в электромагнитной волне.

3. Собирают установку, показанную на рисунке 164, и устанав-

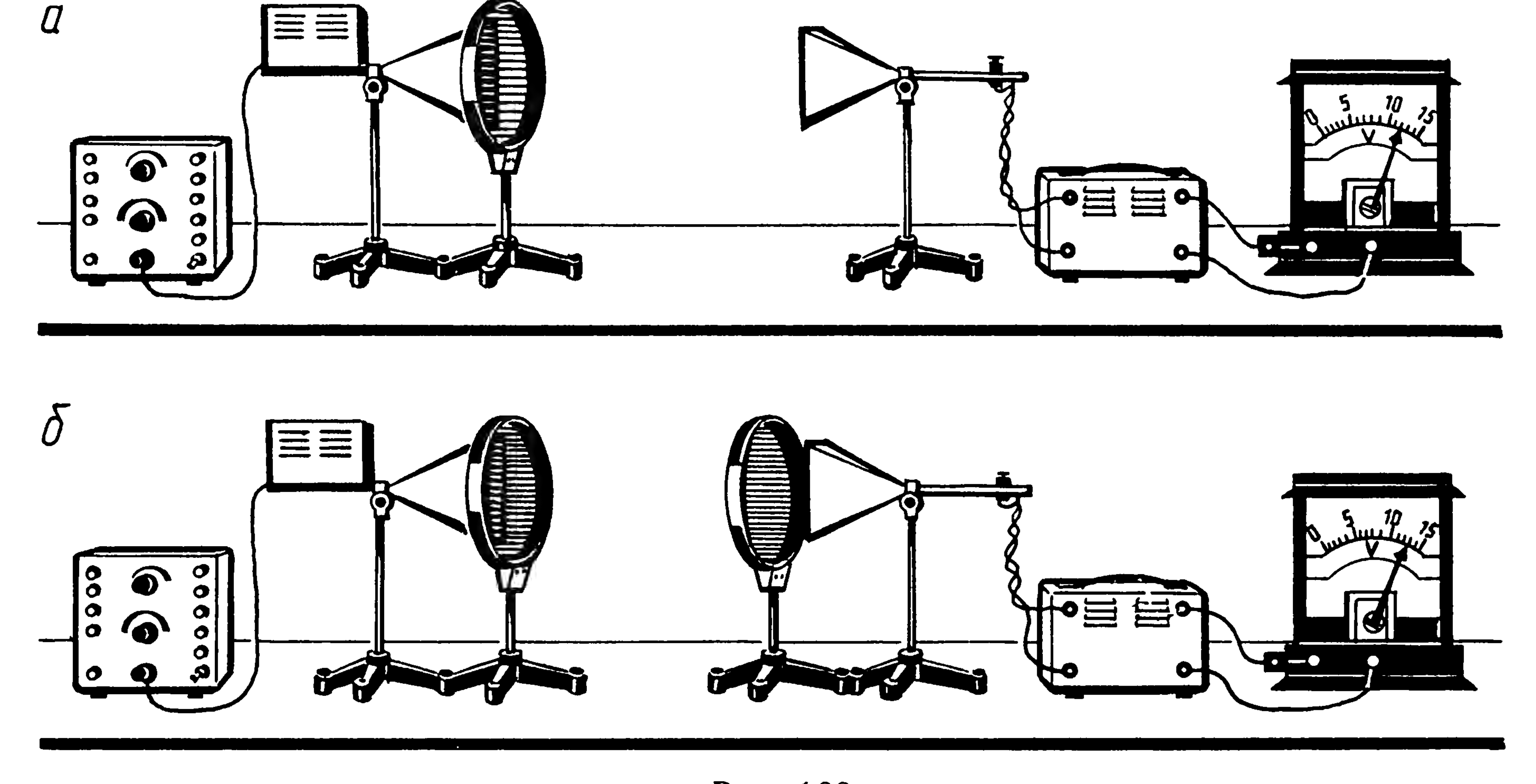


Рис. 163

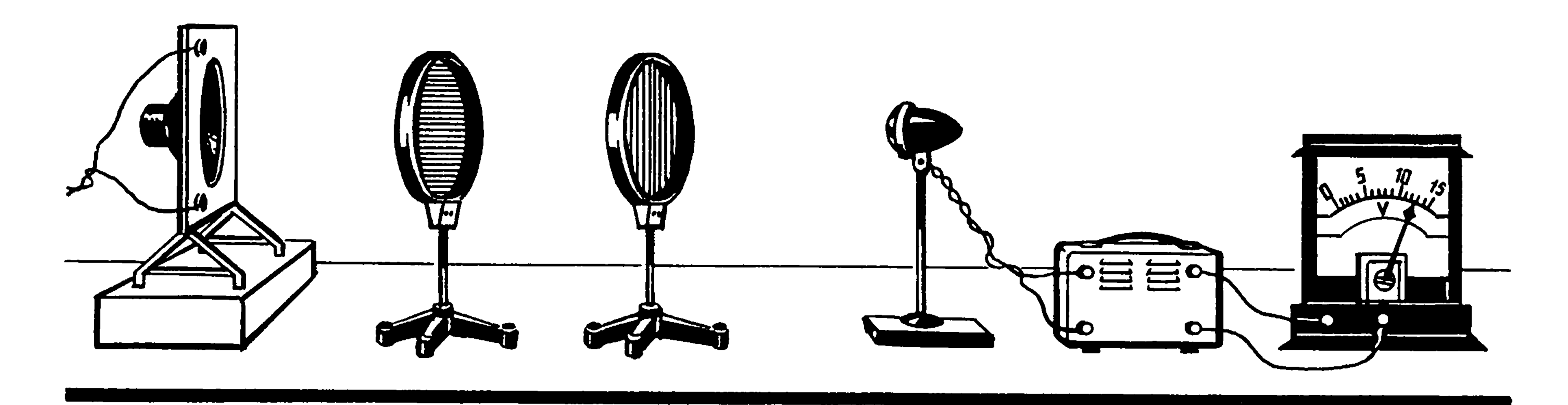


Рис. 164

ливают такую частоту звуковых колебаний, при которых $\lambda = 3$ см (8—10 кГц). Вращая поляризатор и анализатор, обнаруживают, что звуковые волны не поляризуются. Делают вывод, что поляризуются только поперечные волны, а продольные волны не поляризуются.

Опыты 167—169. Поляризация света

Опыты по поляризации света можно проводить как с использованием универсального проекционного аппарата, так и графопроектора. Источником света в нем является галогенная лампа накаливания мощностью 650 Вт, что позволяет использовать прибор в незатемненном классе. Вентиляция кодоскопа позволяет включить его на длительное время и ставить опыты без применения теплофильтра. Выпускаемый промышленностью набор по поляризации света в сочетании с набором по интерференции и дифракции света и кодоскопом позволяет демонстрировать все основные опыты по данной теме.

1. Для демонстрации опыта собирают установку по рисунку 165. В этой установке в качестве источника света используют графопроектор.

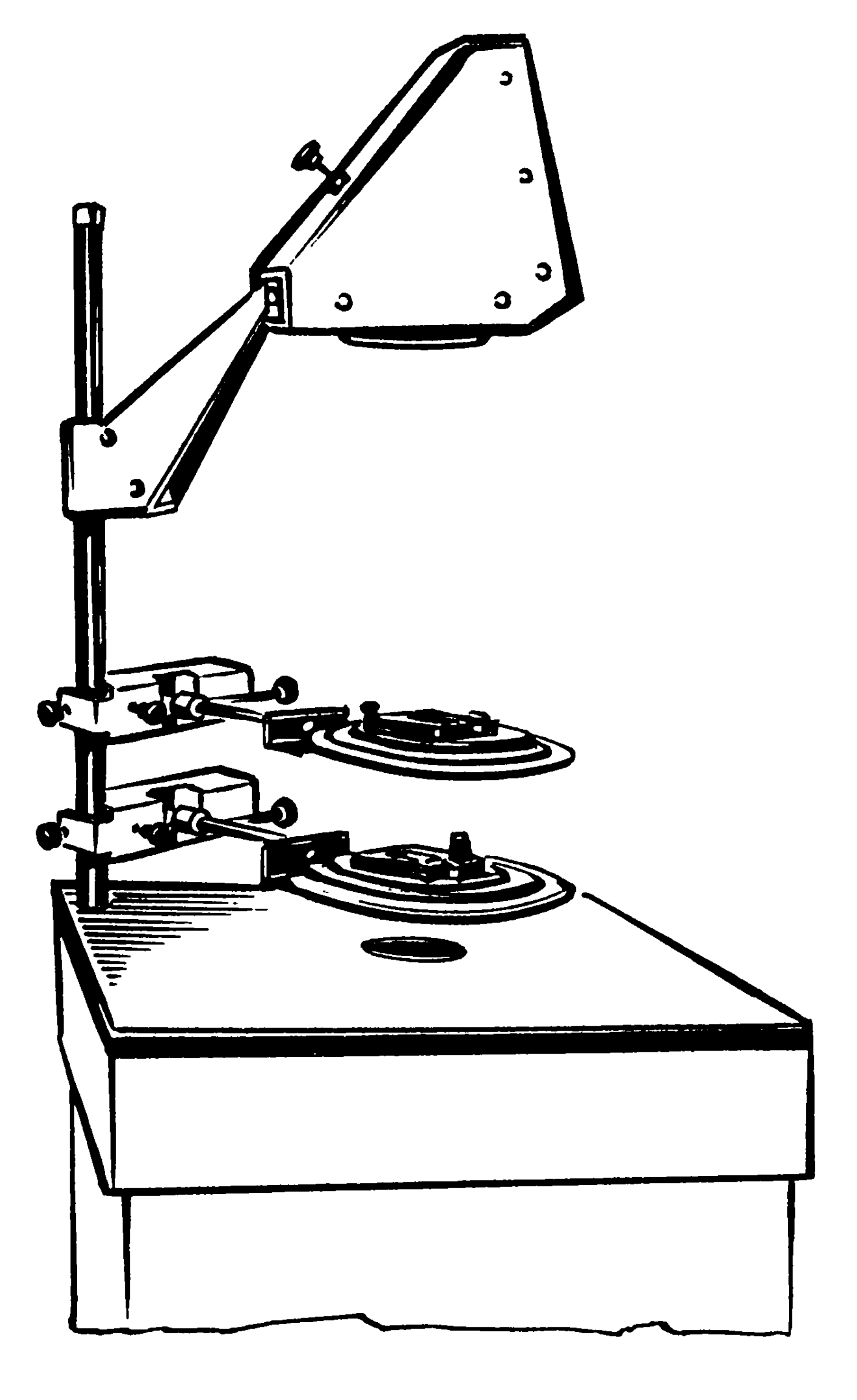
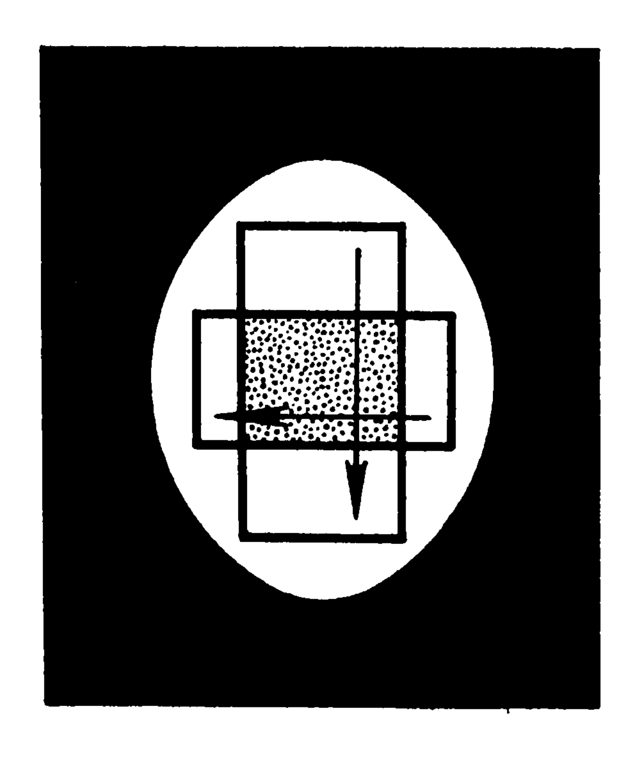




Рис. 165



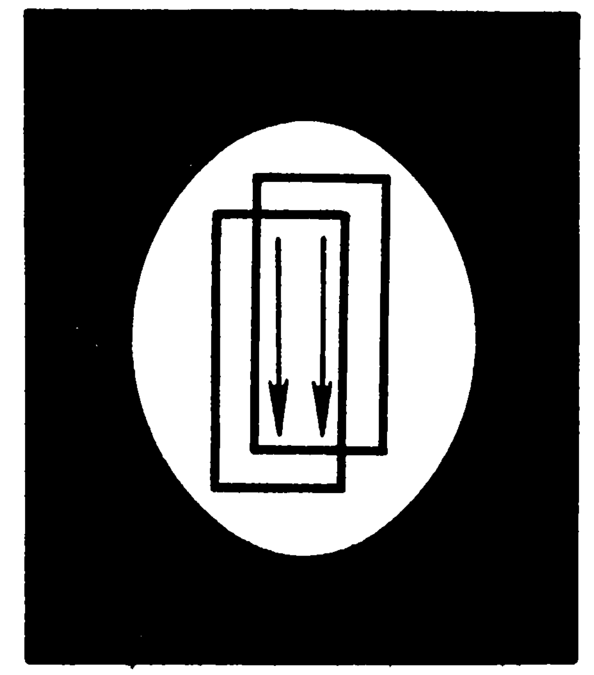


Рис. 166

При подготовке к опыту оба поляроида укрепляют на дисках-ширмах из набора по интерференции и дифракции света. На поляроиды накладывают вырезанные из черной бумаги небольшие стрелки-указатели так, чтобы они могли проецироваться на экран вместе с поляроидами и при скрещенных поляроидах были перпендикулярны друг к другу. Для выделения пучка света блок конденсора закрывают картонным листом с круглым отверстием в середине. Диаметр отверстия должен быть чуть меньше диаметра поляроида. Плавно меняя положение проекционной головки кодоскопа, на экране получают четкое изображение отверстия. Затем один из поляроидов с помощью рейтера от проекционного аппарата ФОС закрепляют к стержню проекционной головки кодоскопа так, чтобы он оказался непосредственно над отверстием. Плавно поворачивают поляроид до 360°. Освещенность круга на экране при этом не меняется. Опыт повторяют со вторым поляроидом. После этого оба поляроида закрепляют к стержню проекционной головки так, чтобы их центры совпали с центром отверстия и стрелки-указатели были в одной плоскости. С помощью проекционной головки снова проецируют второй поляроид на экран. Затем медленно поворачивают второй поляроид относительно первого. При этом освещенность круга на экране меняется от максимальной до минимальной через каждые 90°.

Результаты опыта с поляроидами объясняются поперечностью световых волн. Естественный свет неполяризован. Пройдя через первый поляроид, он становится плоскополяризованным. В данном случае первый поляроид является поляризатором, а второй — анализатором. Светопропускаемость анализатора зависит от его ориентации относительно поляризатора. Если направления, в которых поляризатор и анализатор пропускают свет, параллельны, то через них свет проходит (рис. 166), а если эти направления перпендикулярны, то второй поляроид (анализатор) не пропускает свет на экран. Полезно опыт повторить, поменяв местами поляроиды, т. е. показать, что каждый из них может служить как поляризатором, так и анализатором.

2. Установка для демонстрации опыта с использованием проекционного аппарата ФОС изображена на рисунке 167.

На оптическую скамью перед конденсором устанавливают теплофильтр, за ним — один из поляроидов, предварительно закрепив его на диске-ширме. С помощью объектива поляроид проецируют на экран в виде яркого круга. Плавно поворачивают поляроид до 360°. Обращают внимание учащихся на то, что при этом освещенность круга на экране не меняется. Опыт повторяют со вторым поляроидом. Затем на скамью устанавливают оба поляроида так, чтобы стрелки-указатели были в одной плоскости. С помощью объектива снова проецируют на экран освещенную часть второго поляроида. Медленно поворачивают второй поляроид относительно первого. Обращают внимание учащихся на то, что при повороте на каждые 90° освещенность круга на экране меняется от максимальной до минимальной.

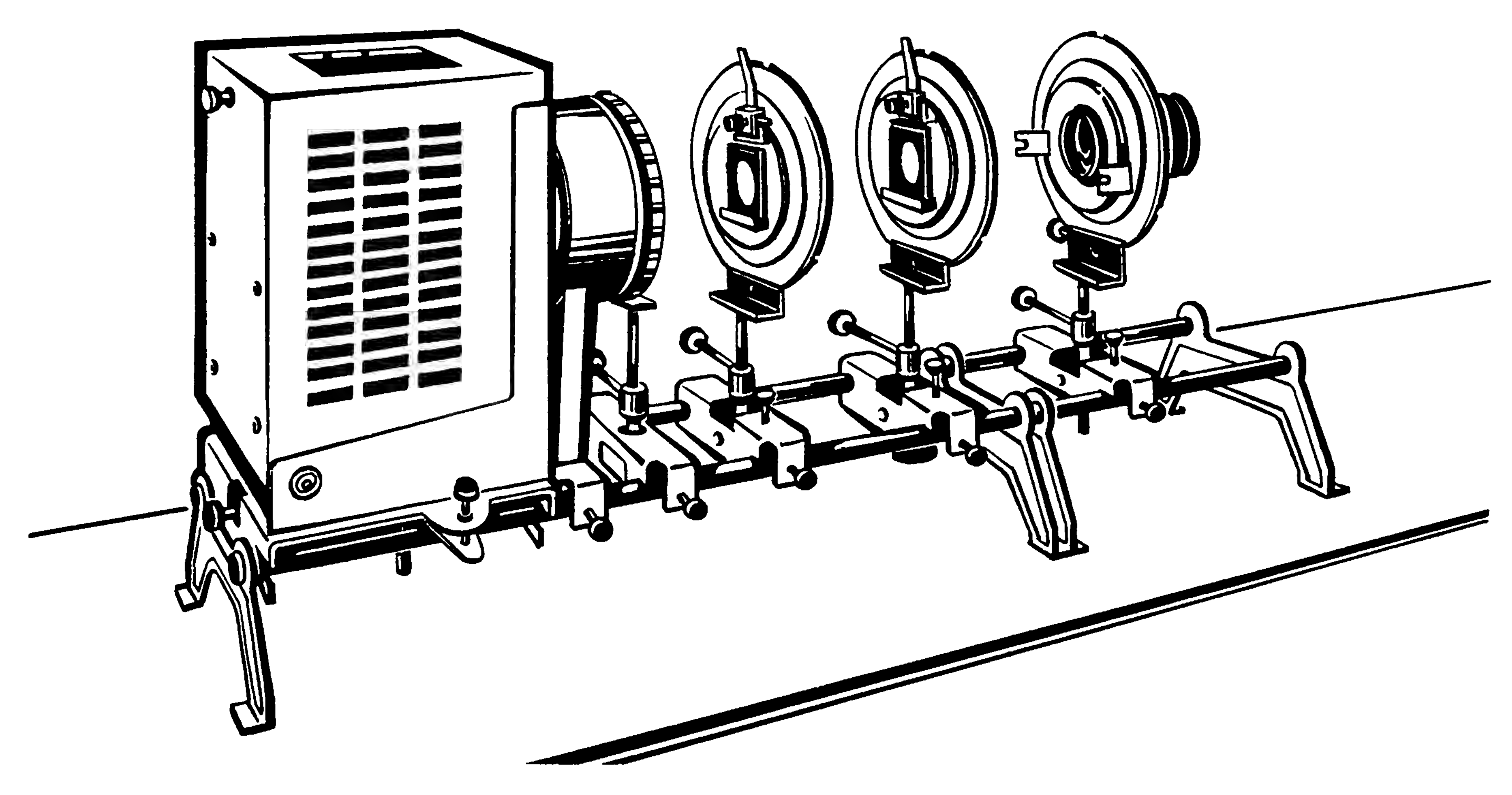


Рис. 167

3. Ознакомление учащихся с поляризацией света, излучаемого газовым лазером, позволяет глубже понять использование его для оптической связи.

Установка для демонстрации опыта изображена на рисунке 168.

На пути прямого пучка света лазера помещают поляроид. При плавном вращении поляроида освещенность светового пятна на экране от света лазера меняется от максимального до минимального значения через каждые 90°, что свидетельствует о поляризованности света газового лазера.

В заключение полезно показать учащимся учебный кинофильм «Поляризация света».

В первом фрагменте, названном «Поляризация волн», показано прохождение продольных волн через две решетки. Ориентация решеток не влияет на прохождение волн. Раскрывается роль поляризатора и анализатора. Рассказывается о прохождении поперечных волн через поляризатор и анализатор с параллельными, непараллельными, а затем с перпендикулярными щелями.

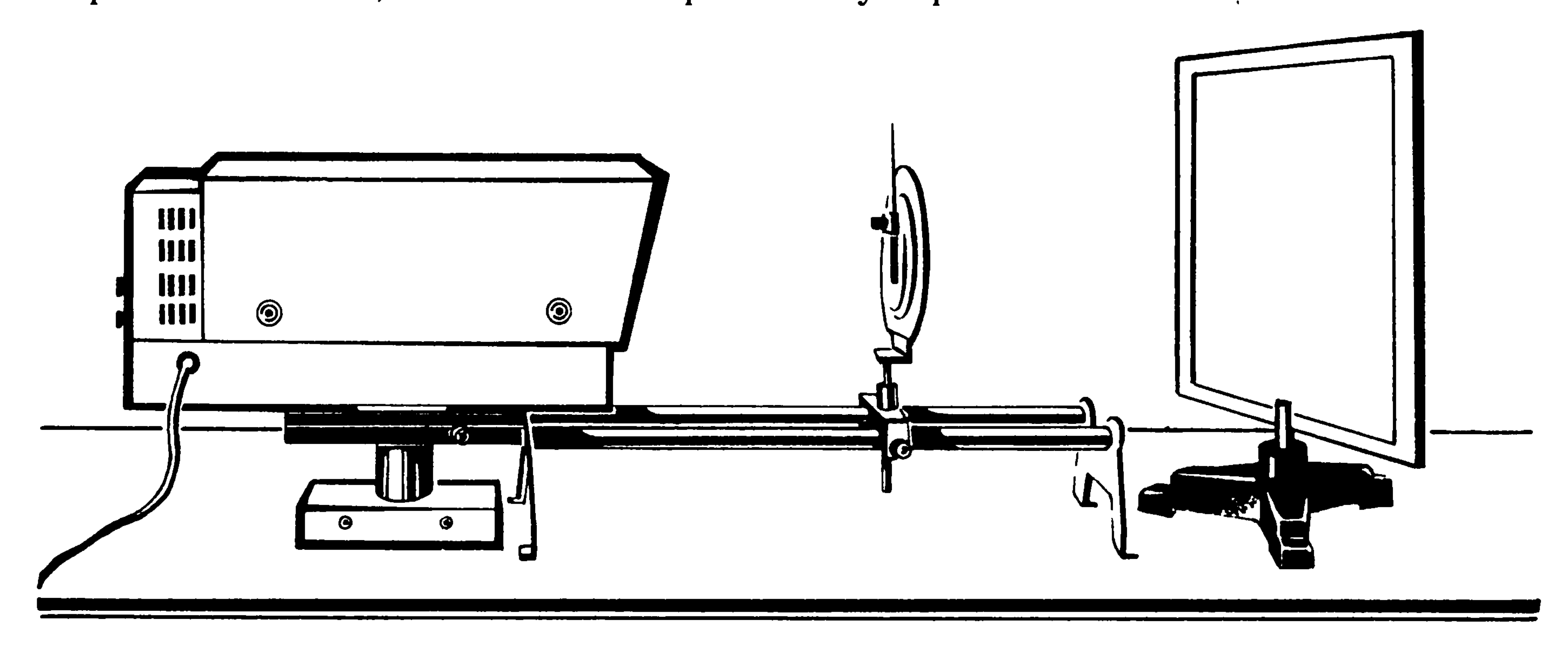


Рис. 168

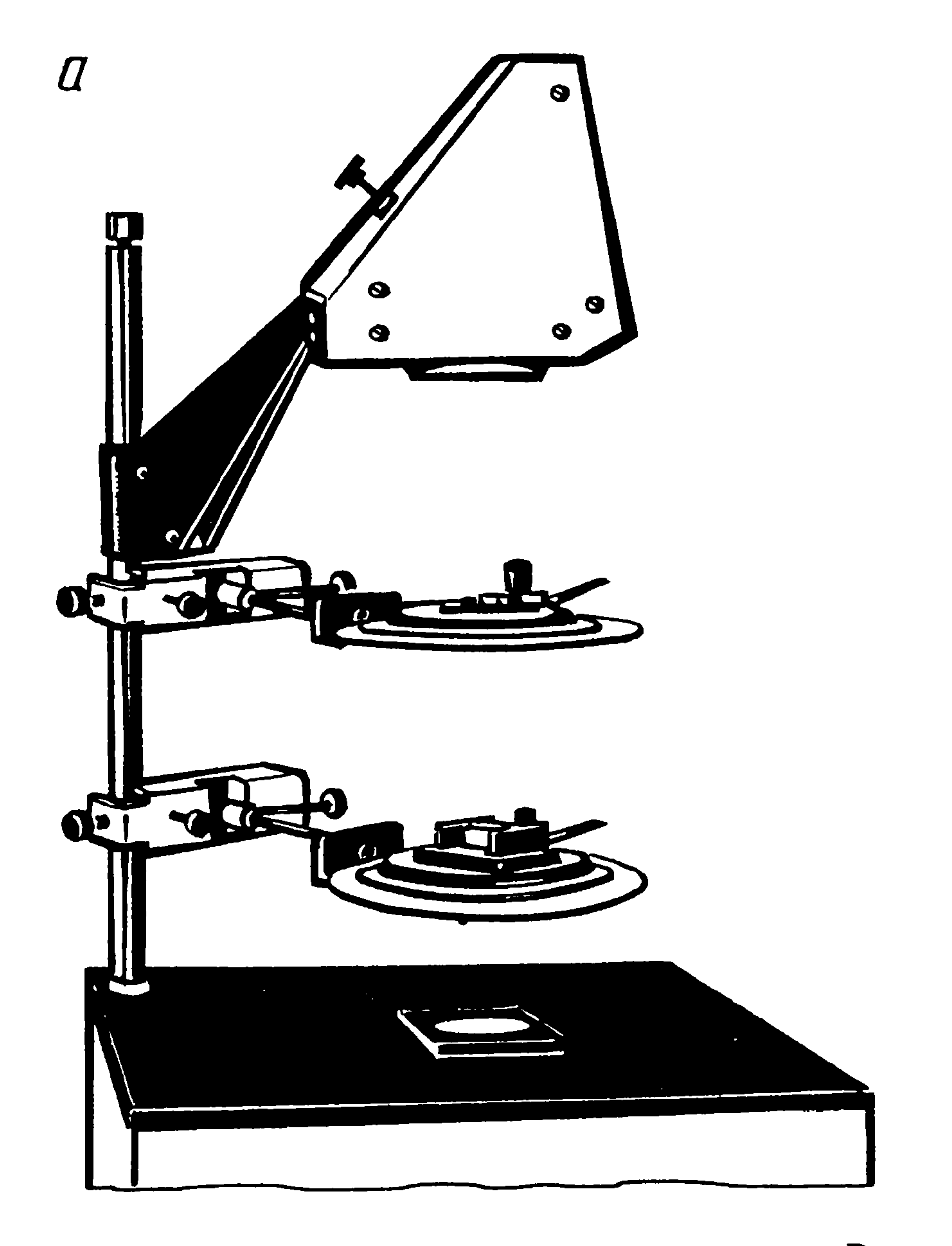
Во втором фрагменте «Поляризация света» напоминается об электромагнитной природе света, рассказывается о поляризаторах и анализаторах для световых волн, а также об источниках света — лазерах, позволяющих получить поляризованное излучение.

В третьем фрагменте «Применение поляризованного света» показано, как можно управлять интенсивностью света с помощью двух скрещенных поляроидов. Рассмотрены устройство и принцип действия ячейки Керра.

Опыт 170. Исследование деформаций с помощью поляризованного света

Целью опыта является ознакомление учащихся с практическим использованием поляризации света для исследования деформаций в различных деталях машин и сооружений.

Для проведения опыта собирают установку, изображенную на рисунке 169. Для выделения пучка света блок конденсора кодоскопа закрывают картонным листом с круглым отверстием в середине. Закрепив примерно к середине стержня проекционной головки модель исследуемой детали, на экране получают четкое ее изображение (рис. 170, *а*). Потом перед моделью и за ней устанавливают поляроиды в нескрещенном положении. Затем поляроиды скрещивают, а модель сжимают с помощью винтового пресса. При этом на фоне изображения модели появляется картина распределения напряжений (рис. 170, *б*).



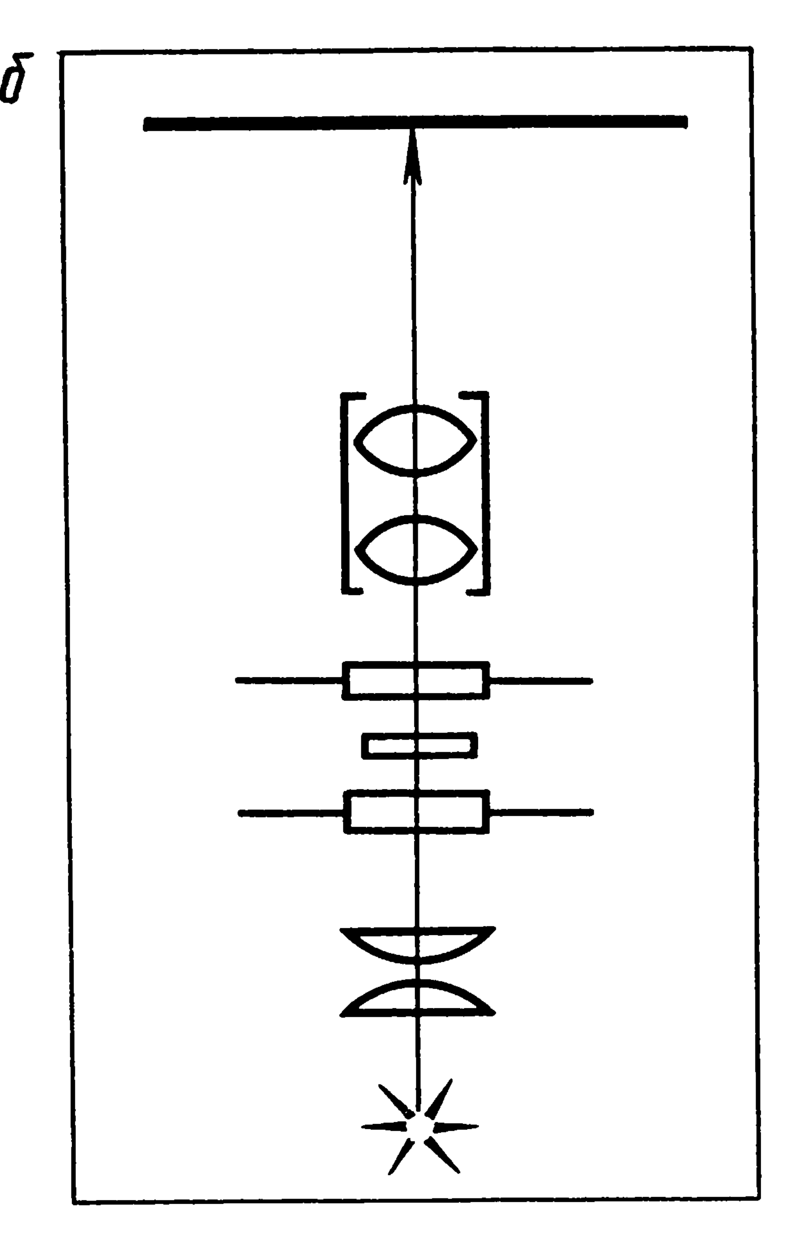


Рис. 169

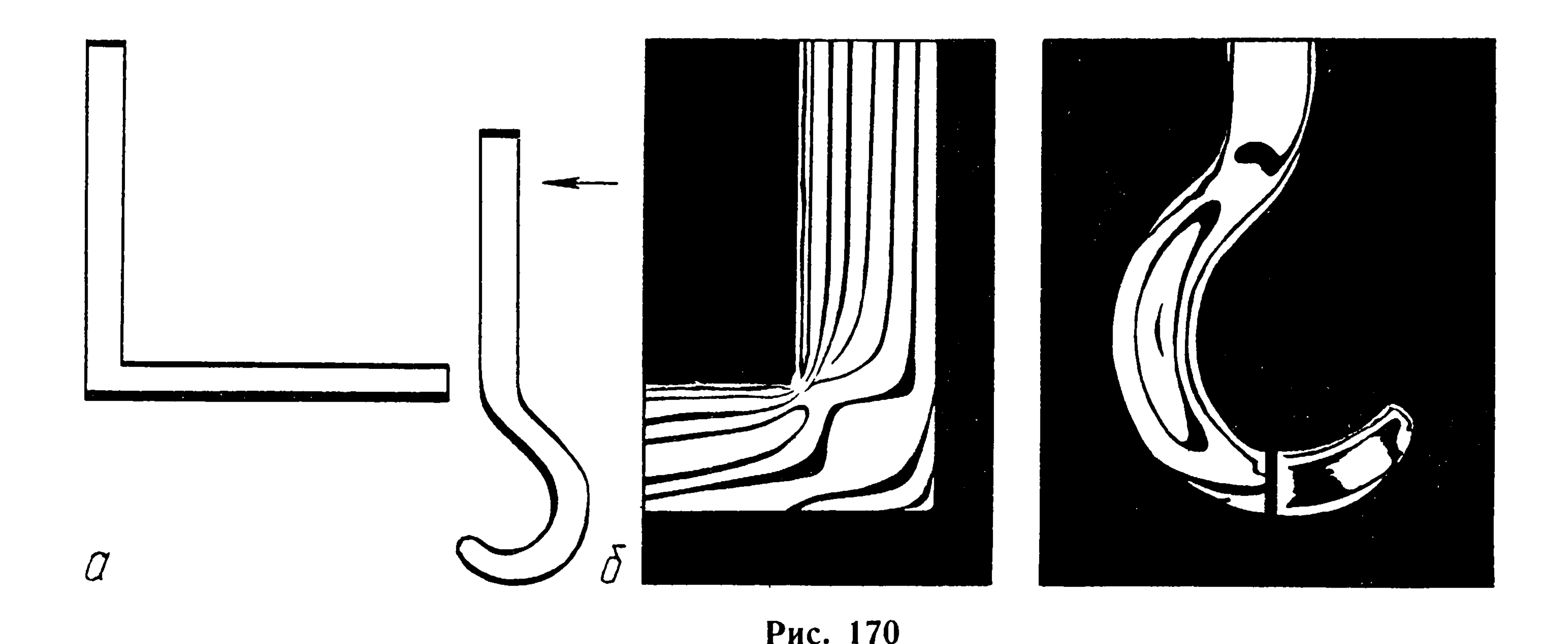


Рис. 170

Опыты 171—172*. Эффект Доплера

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 86. С помощью одиночного вибратора *В*, закрытого макетом лодки, возбуждают колебания очень низкой частоты. Наблюдают распространение волн. С помощью светлой лески укрепляют на экране силуэт наблюдателя *Н*, вырезанный из плотной черной бумаги. Силуэт может перемещаться вдоль лески.

Объясняют, что неподвижный относительно воды и вибратора наблюдатель *Н* за время t насчитает N пришедших к нему волн. По этим данным он определит частоту колебаний:

$$\nu = \frac{N}{t}.$$

Быстро передвигают вибратор, закрытый силуэтом лодки, по направлению к наблюдателю. Замечают, что в этом случае длина волны, воспринимаемая наблюдателем, стала меньше (рис. 171). Наблюдатель «насчитывает» за то же время N_1 пришедших к нему волн. По этим данным он определит частоту:

$$\nu_1 = \frac{N_1}{t}.$$

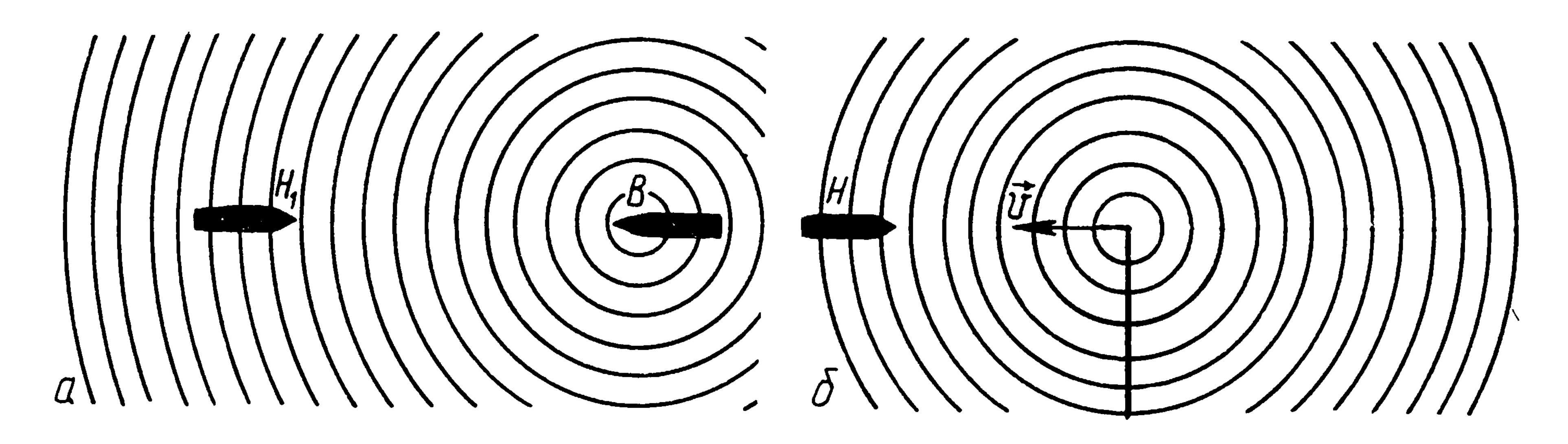


Рис. 171

Ясно, что $\nu_1 > \nu$.

Обозначив скорость распространения волн через u, а скорость движения лодки с вибратором — через v, можно найти соотношение между частотами ν_1 и ν.

Действительно, длину волны, испускаемую движущимся вибратором, можно выразить двумя способами:

$$\lambda_1 = \frac{u-v}{\nu},$$

$$\lambda = \frac{u}{\nu_1}.$$

Отсюда $\frac{u-v}{\nu} = \frac{u}{\nu_1}$, а $\nu_1 = \frac{\nu u}{u-v}$,

или $\nu_1 = \nu \frac{u}{u-v} = \nu \frac{1}{1-v/u}$.

Если бы вибратор двигался по воде от наблюдателя, то аналогичным образом можно получить формулу

$$\nu_1 = \nu \frac{1}{1+v/u}.$$

Далее можно повторить рассуждения для наблюдателя, движущегося к неподвижному относительно воды вибратору. При этом перемещают по экрану макет лодки с наблюдателем (рис. 172).

Такой наблюдатель H_1 насчитывает N_1 волн, причем $N_1 > N$ (он сосчитает и те волны, которые лежат на пройденном им самим расстоянии s):

$$\Delta N = N_1 - N = \frac{s}{\lambda} = \frac{vt}{u/\nu} = \frac{vt\nu}{U}.$$

Воспринимаемая подвижным наблюдателем частота выразится так:

$$\nu_1 = \frac{N}{t} = \frac{N+\Delta N}{t} = \frac{N}{t} + \frac{\Delta N}{t}.$$

Подставив найденное значение ΔN, получим

$$\nu_1 = \nu\left(1 + \frac{v}{u}\right).$$

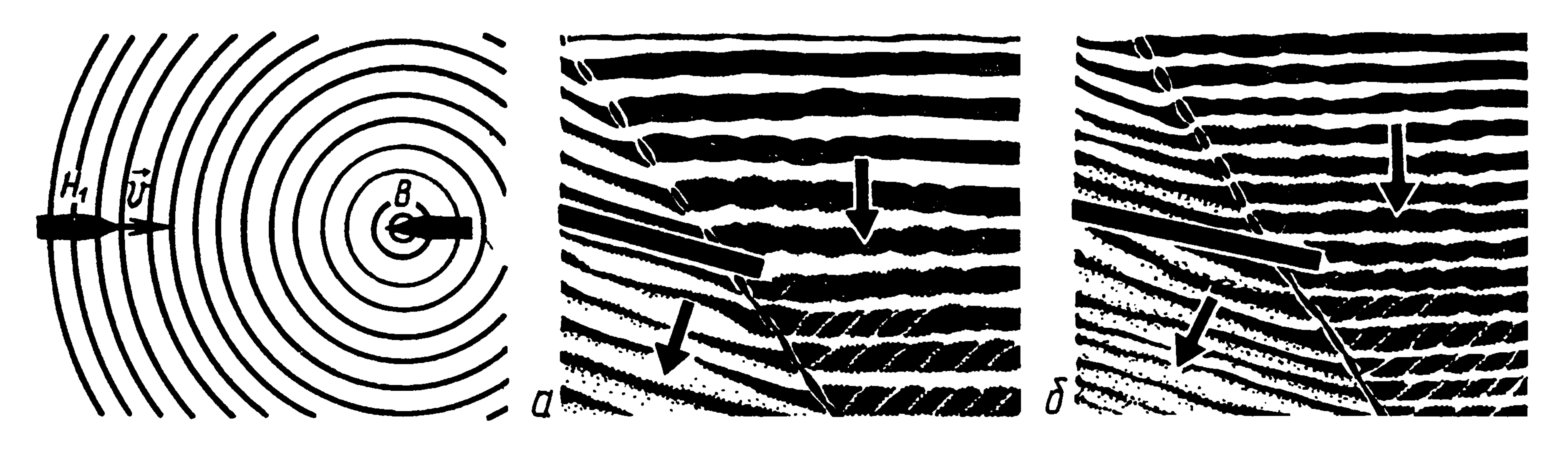


Рис. 172 Рис. 173

Если наблюдатель движется от вибратора, получаем

$$\nu_1 = \nu\left(1 - \frac{v}{u}\right).$$

Из вышесказанного следует сделать вывод, что при движении вибратора и при движении наблюдателя относительно среды частота воспринимаемых наблюдателем колебаний изменяется: увеличивается при их сближении и уменьшается при удалении.

Учащиеся обычно не понимают, почему изменение частоты, вызванное движением вибратора относительно среды (в данном случае воды), и движение наблюдателя относительно той же среды дают неодинаковые результаты. Им кажется, что это противоречит принципу относительности. Ошибка в рассуждениях учащихся состоит в том, что они не учитывают роли среды. Движения вибратора и наблюдателя происходят не только относительно друг друга, но и относительно среды. Так что мы, по существу, наблюдаем два хотя и близких, но в принципе различных явления. Естественно, что и результаты получаются разными.

2. К звуковому генератору с помощью длинных гибких и достаточно прочных проводов подключают электромагнитный телефон. Установив частоту 600—800 Гц, включают звуковой генератор и слушают звучание телефона. Затем вращают телефон по окружности радиусом 50—60 см с частотой 2—3 Гц. В плоскости, перпендикулярной классной доске, учащиеся замечают периодическое повышение и понижение частоты звука, соответствующее приближению телефона к ним и его удалению от них.

Вместо телефона можно взять громкоговоритель и подвесить его на проводах. При качаниях громкоговорителя также можно обнаружить периодическое повышение и понижение частоты звука.

Опыты 173—179. Явление дисперсии

Обычно явление дисперсии учащиеся связывают только со спектральным разложением видимого света на 7 основных цветов. Поэтому надо разъяснить, что дисперсия является общим свойством волновых движений и заключается в наличии определенной зависимости между показателем преломления среды и частотой колебаний.

1. Сначала напоминают учащимся, что скорость распространения волн в разных средах различна и что при переходе волн из одной среды в другую наблюдается явление преломления. Показатель преломления численно равен отношению скорости распространения волны в первой среде к скорости ее распространения во второй среде:

$$n = \frac{v_1}{v_2}.$$

Затем ставят перед учащимися вопрос: а не зависит ли показатель преломления волн от частоты? Для получения ответа на

этот вопрос необходимо измерить показатель преломления двух данных сред для волн различной частоты.

Собирают установку, изображенную на рисунке 86. На дно ванны помещают толстое цветное стекло размером примерно в половину дна. На вибратор надевают насадку для возбуждения плоских волн. Включают вибратор и наблюдают преломление волн на границе раздела между различной глубиной ванны. Отметив ориентацию фронта преломленной волны с помощью стержня (рис. 173, *а*), увеличивают частоту колебаний вибратора. Замечают, что ориентация фронта преломленной волны изменилась: она теперь не совпадает с положением стержня (рис. 173, *б*). Опыт подтверждает, что показатель преломления зависит от частоты.

На основании проделанного опыта следует ввести понятие о диспергирующей среде как среде, в которой скорость волн зависит от частоты.

2. Дисперсия — общее свойство волн любой природы, но не все среды, в которых распространяются волны, являются диспергирующими. Например, однородный слой воздуха для звуковых волн не является диспергирующей средой: скорость звуковых волн в воздухе не зависит от их частоты.

Для того чтобы убедиться в этом, к звуковому генератору подключают громкоговоритель. На расстоянии 120—150 мм от громкоговорителя устанавливают плоский экран, отражающий звуковые волны (например, лист фанеры размером 50×50 см). В пространство между громкоговорителем и экраном вносят микрофон на амортизирующей подставке, подключенный к входу осциллографа (рис. 174, *а*) или к усилителю низкой частоты, на выход которого подключен демонстрационный вольтметр (рис. 174, *б*).

Объяснив учащимся идею опыта, включают звуковой генератор и электронный осциллограф. Частоту сигнала звукового генератора

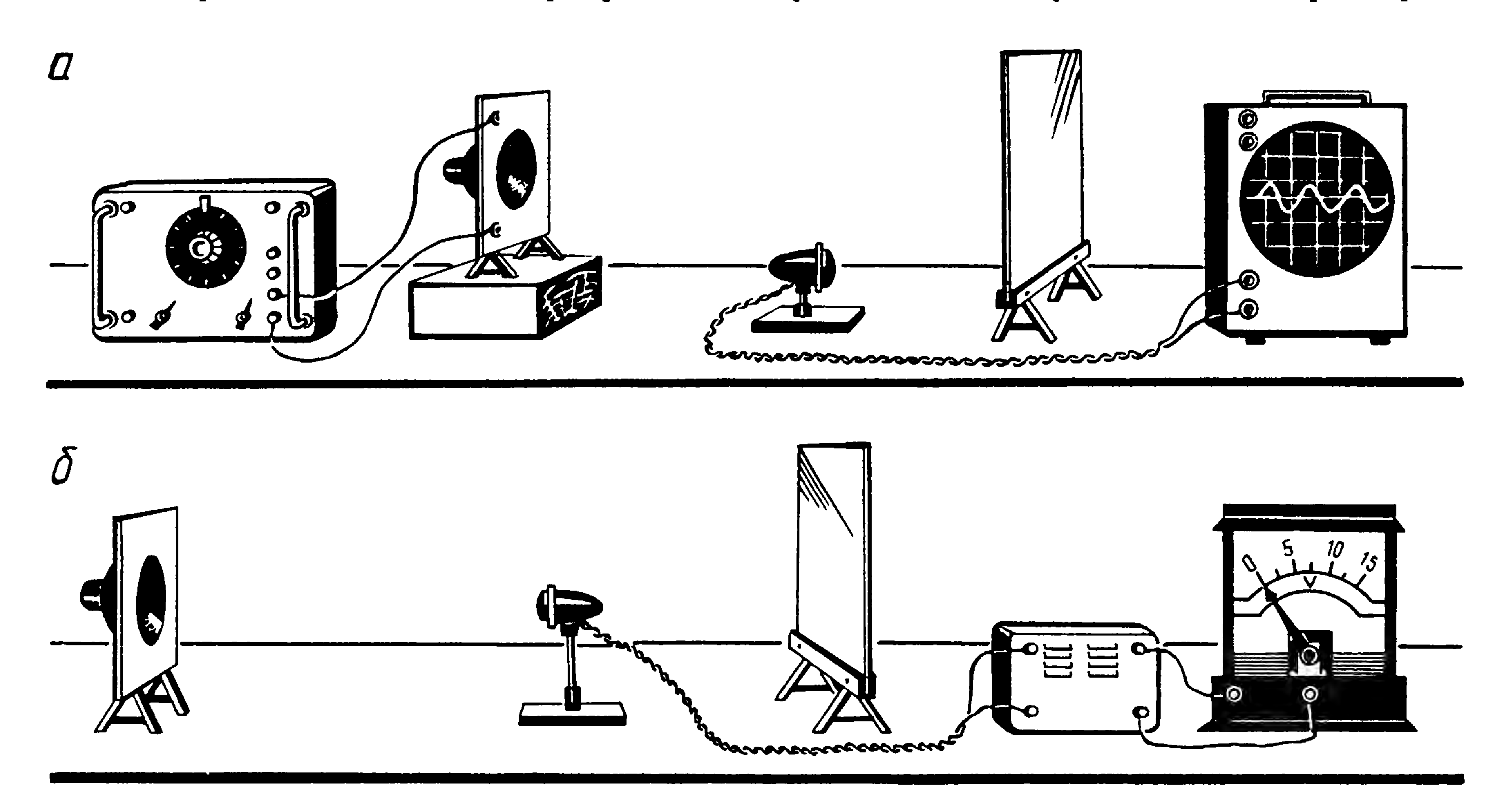


Рис. 174

лучше всего взять равной 1 000 Гц. Передвигая медленно микрофон между громкоговорителем и экраном (для этого микрофон лучше взять в руки), демонстрируют учащимся стоячие звуковые волны. Опыт легко воспринимается учащимися, так как они уже видели аналогичные опыты с электромагнитными волнами.

С помощью демонстрационной линейки измеряют расстояние между двумя узлами, которое оказывается равным примерно 17 см. Это значит, что длина звуковой волны равна 34 см. Зная частоту сигнала (1 000 Гц) и длину волны, определяют скорость звука в воздухе, которая оказывается равной 340 м/с.

Повторяют опыт на частоте 2 000 Гц. В этом случае длина волны будет примерно 17 см, а скорость звука по-прежнему 340 м/с.

Проделывают опыт на частоте 4 000 Гц и вновь обнаруживают, что скорость звука оказывается около 340 м/с. Ставят перед учащимися вопрос: имеет ли место явление дисперсии для звуковых волн? Получив отрицательный ответ, объясняют, что именно отсутствие дисперсии звуковых волн в воздухе дает нам возможность наслаждаться музыкой. Если бы имела место дисперсия, сложные музыкальные звуки искажались бы, так как гармонические составляющие различной частоты распространялись бы с различной скоростью. Это привело бы к тому, что на некотором расстоянии от оркестра его нельзя было бы слушать из-за искажений, связанных с тем, что одновременно испускаемые им звуки доходили бы до слушателей в разное время.

3. В хорошо затемненной аудитории на оптическом диске устанавливают толстую стеклянную пластину и с помощью оптической скамьи направляют на пластину параллельный пучок света. Просят учащихся группами по 8—10 человек подойти к демонстрационному столу. Выключив свет в аудитории, обращают внимание учащихся на то, что в стекле на границе с воздухом пучок белого света расщепляется на множество плавно переходящих друг в друга цветных полос. Опыт свидетельствует о том, что стекло для световых волн является диспергирующей средой. Свет в стекле диспергирует.

4. Собирают установку по схеме, изображенной на рисунке 175.

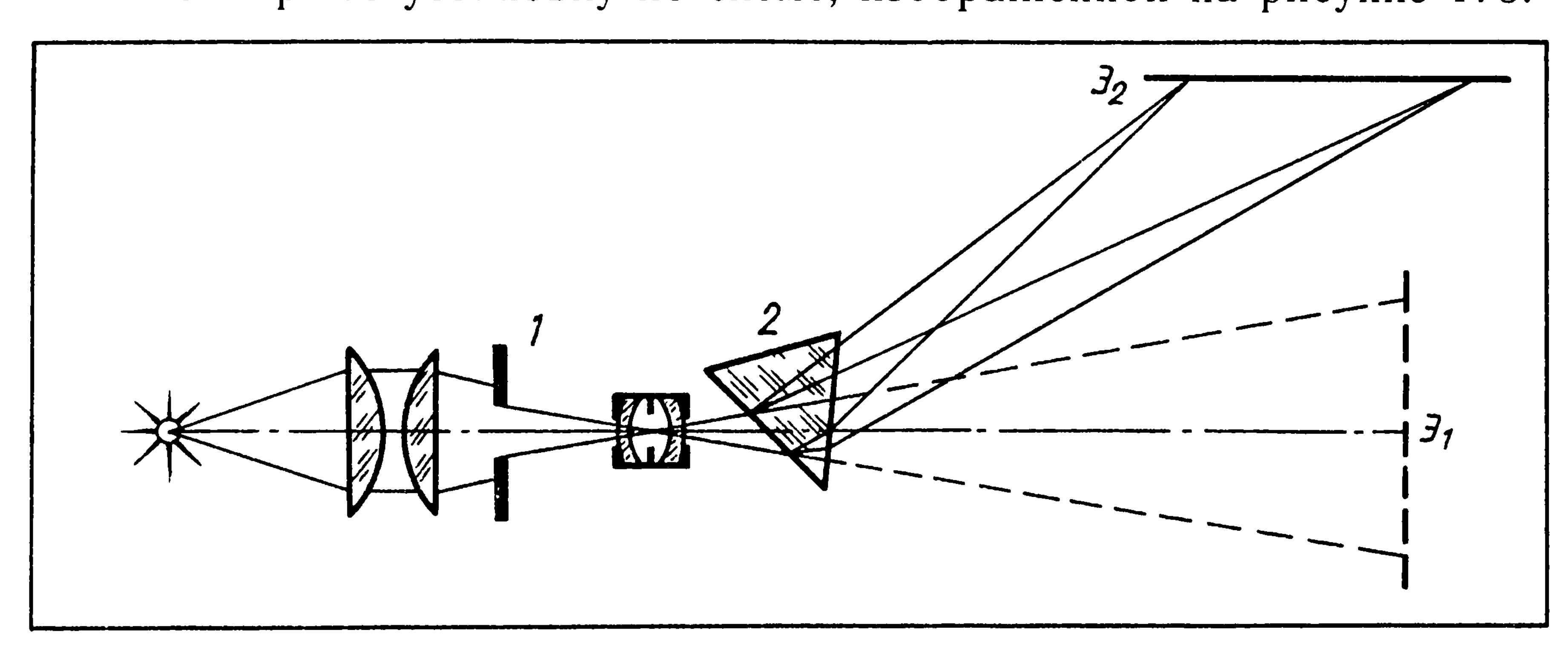


Рис. 175

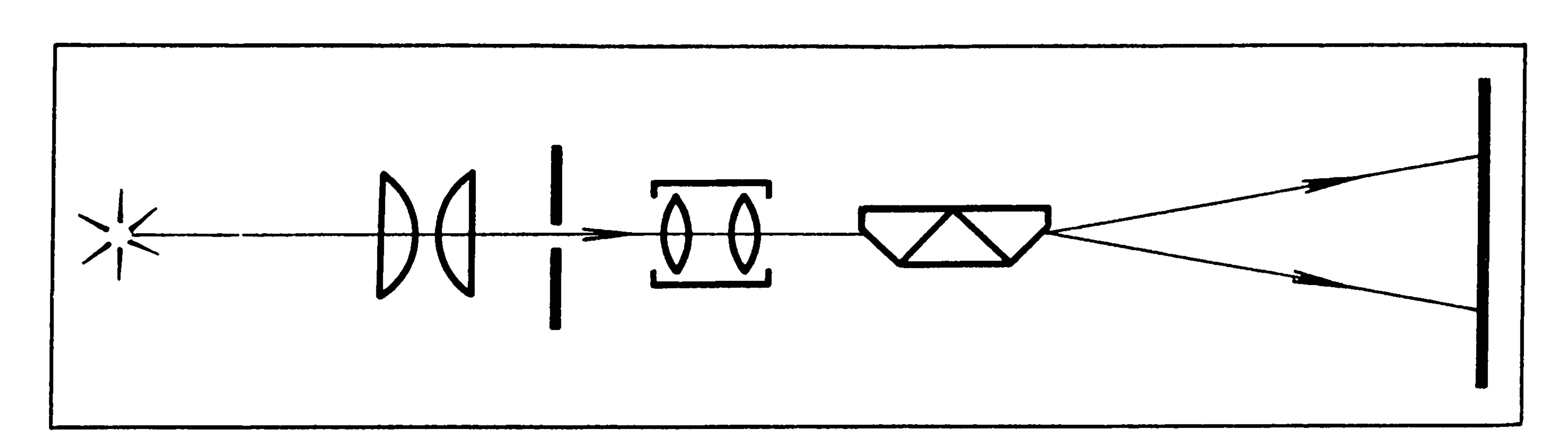
На этом рисунке расположение приборов и деталей дано в плане. На отражающий экран $Э_1$ проецируют вертикальную щель *1* шириной около 2 мм. На малый подъемный столик помещают призму «Флинт» *2* так, как показано на рисунке, а перед пучком отклоненного призмой пучка света ставят прозрачный экран $Э_2$, на котором хорошо виден спектр белого света.

Чтобы показать, что диспергирующие свойства стекла зависят от его состава, на призму «Флинт» ставят призму «Крон» так, чтобы их ребра совпали. Эта призма освещается тем же самым пучком света, что и первая. На экране *Э* образуется второй спектр, менее растянутый, чем первый.

5. Если в кабинете есть призма прямого зрения, опыты по дисперсии света целесообразно продолжить и показать спектральное разложение света, даваемое призмой прямого зрения. В этом случае оптическая скамья ставится поперек демонстрационного стола (рис. 176). На прозрачном экране получается очень красивый, надолго запоминающийся спектр белого света.

6. Неразложимость монохроматического света. Для демонстрации опыта собирают установку по рисунку 177.

Включив лазер *1*, обращают внимание учащихся на цвет пучка света на экране *2*. Затем на пути лазерного пучка помещают на подъемном столике призму *3*. Пучок света лазера, проходя призму,



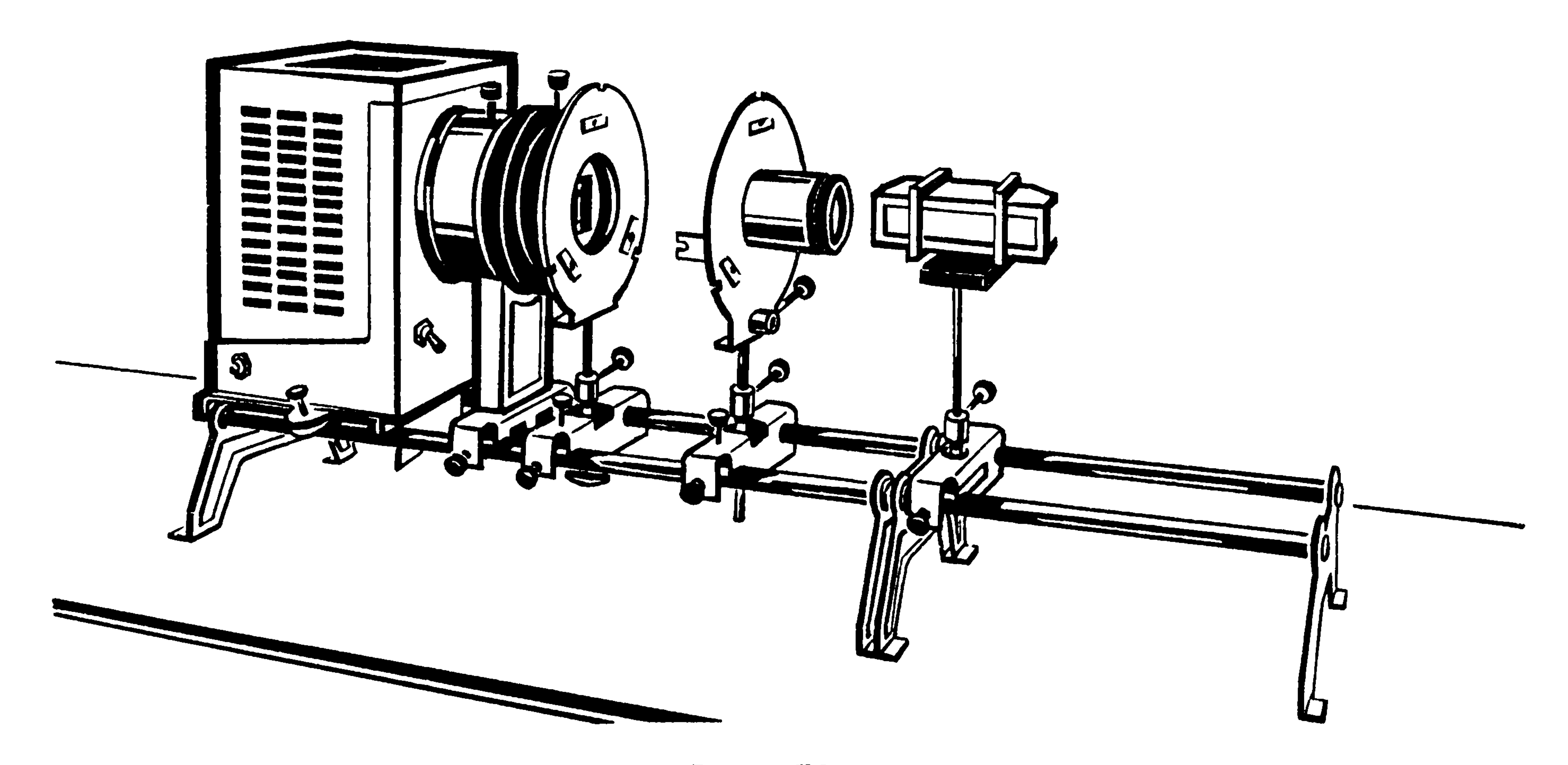
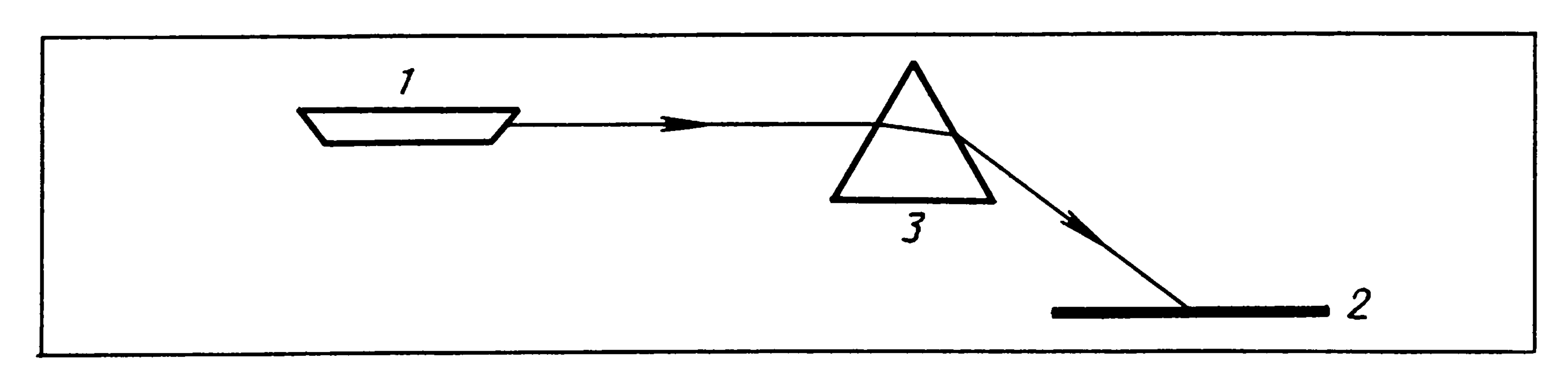


Рис. 176



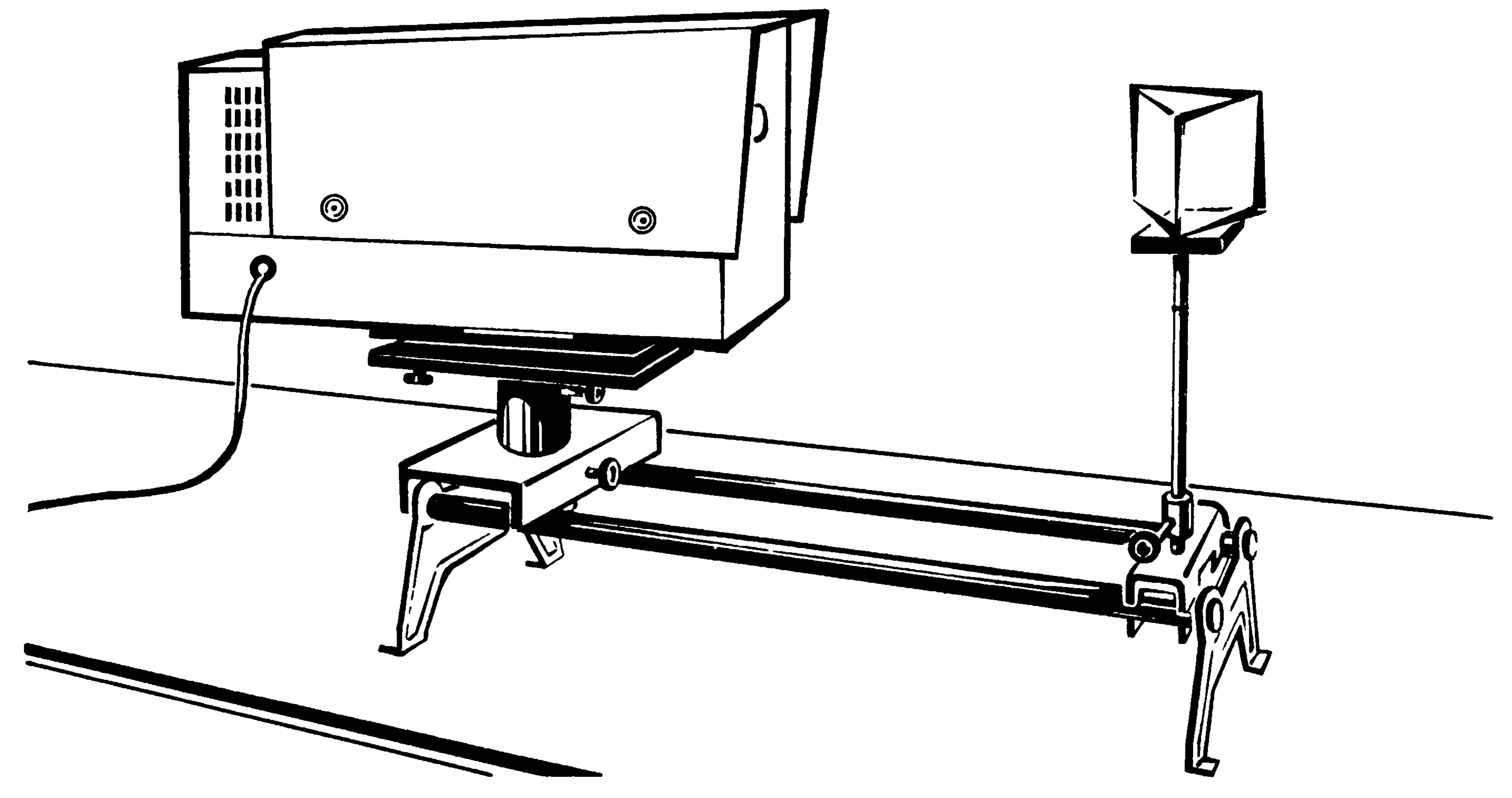


Рис. 177

отклоняется в сторону ее основания и падает на экран; его цвет на экране не меняется, что свидетельствует о неразложимости света лазера.

7. Сложение спектральных цветов. Опыты по сложению цветов убеждают учащихся в том, что одновременное воздействие на зрение человека света различных цветов создает ощущение белого света.

Существует несколько способов сложения спектральных цветов. Для демонстрации наиболее удобны два из них:

А. Сложение спектральных цветов с помощью прибора для сложения цветов спектра.

Для демонстрации опыта собирают установку по схеме рисунка 176. Описанным в опыте 178 способом получают четкий и яркий сплошной спектр на переносном экране. Далее между переносным экраном и призмой устанавливают прибор для сложения цветов так, чтобы весь спектр (от красных до фиолетовых лучей) попадал на зеркала прибора (рис. 178). Вращая зеркала прибора на переносном экране, переставленном на другое место, получают отдельные одноцветные полосы. Затем таким же способом все отраженные от зеркал лучи собирают в одну точку. При этом на экране наблюдают белый свет, близкий к исходному.

Б. Не меняя установку предыдущего опыта, вместо прибора для сложения цветов спектра на столике устанавливают вторую

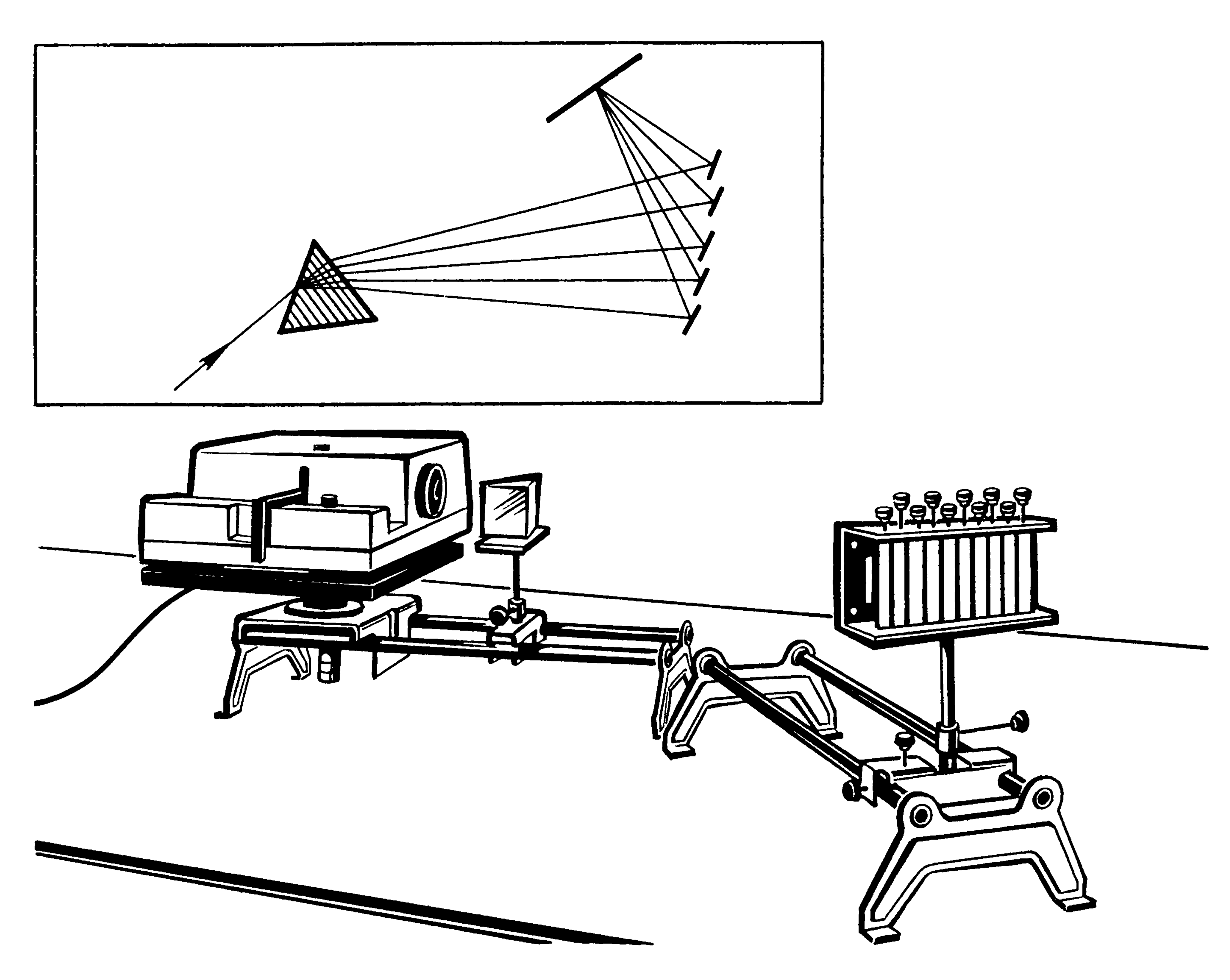


Рис. 178

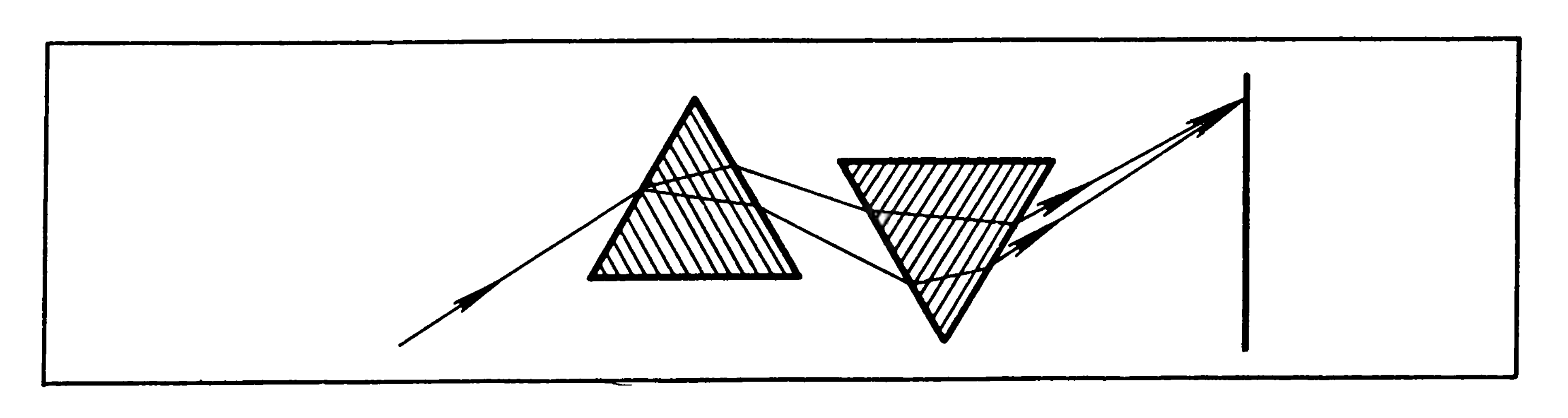
призму, а на пути лучей, идущих от второй призмы, устанавливают переносной экран (рис. 179). Как видно из рисунка, ребра преломляющих углов обеих призм обращены в противоположные стороны, а обращенные друг к другу грани параллельны. При таком расположении первая призма разлагает белый свет на составные цвета, а вторая — складывает, в результате получается белый свет, близкий к тому, какой дает источник света.

§ 12. Техническое применение электромагнитных волн

Техническое применение электромагнитных волн весьма многообразно. Программой предусмотрено ознакомление школьников с радиолокацией, радиоуправлением и радиосвязью. В описанных ниже опытах основное внимание обращено на демонстрацию принципа работы соответствующих приборов, аппаратов и установок.

Опыт 180. Радиоуправление

Собирают установку, изображенную на рисунке 180. Включают генератор. Через 30—40 с замыкают телеграфный ключ. Замечают



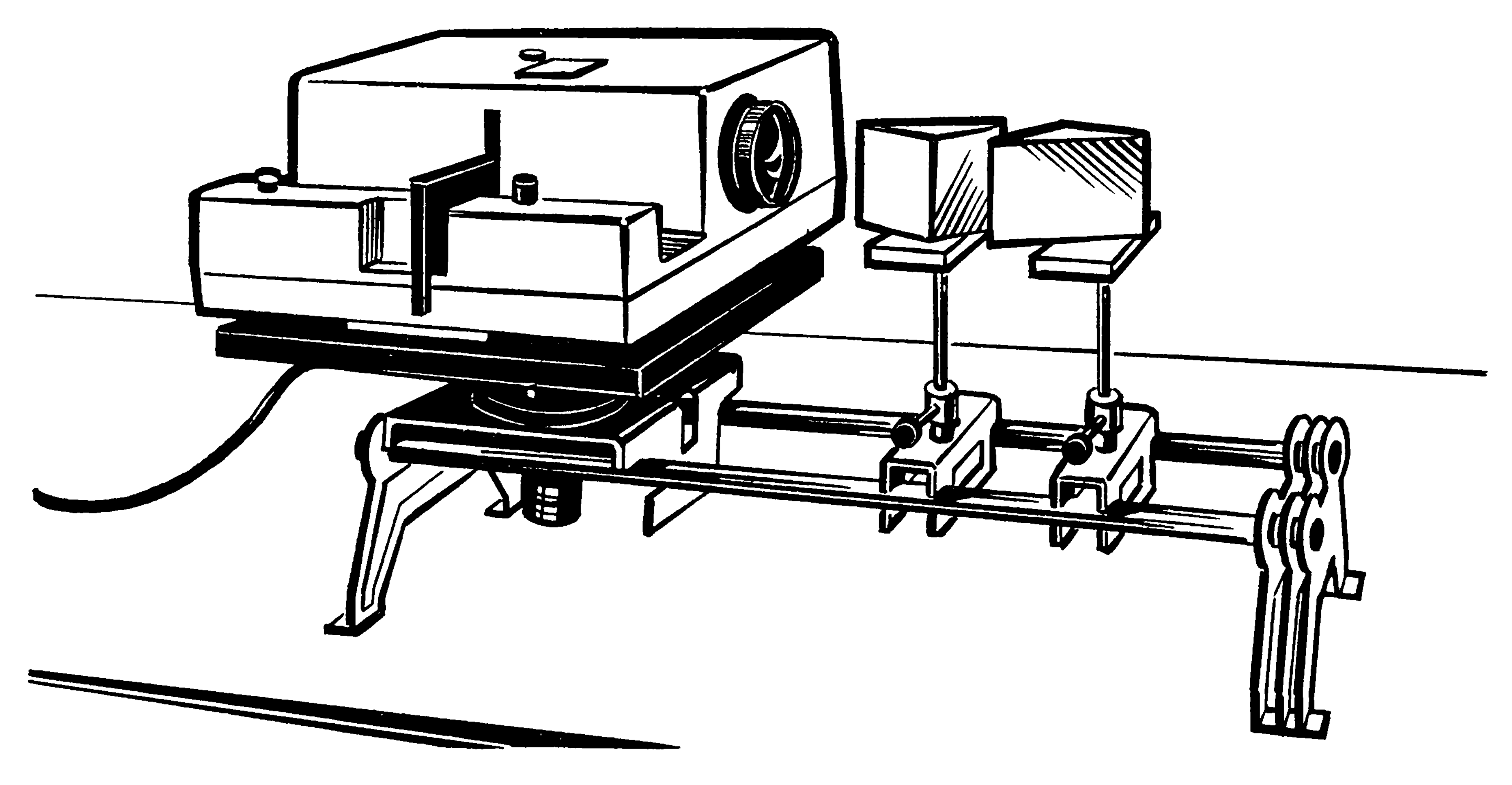


Рис. 179

свечение лампочки, включенной в исполнительную цепь приемника. Объясняют, что принятый приемной антенной сигнал заставил сработать поляризованное реле, которое подключило лампочку к источнику питания. Заменив лампочку микродвигателем, на оси которого укреплен раскрашенный в два цвета диск, повторяют опыт. После нажатия на ключ двигатель начинает работать.

Удаляют приемник от передатчика на 5—6 м и замечают, что двигатель перестает работать. Объясняют учащимся, что в этом случае сигнал, принимаемый антенной, слаб и его энергии недостаточно для срабатывания поляризованного реле. Делают вывод, что принятый антенной сигнал необходимо усилить. Между антен-

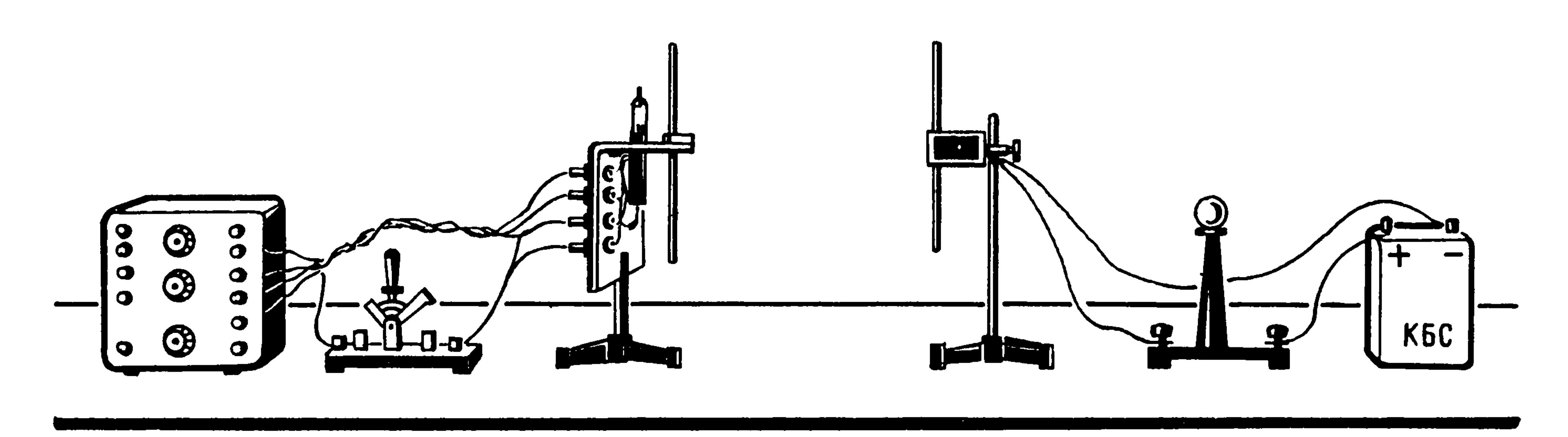


Рис. 180

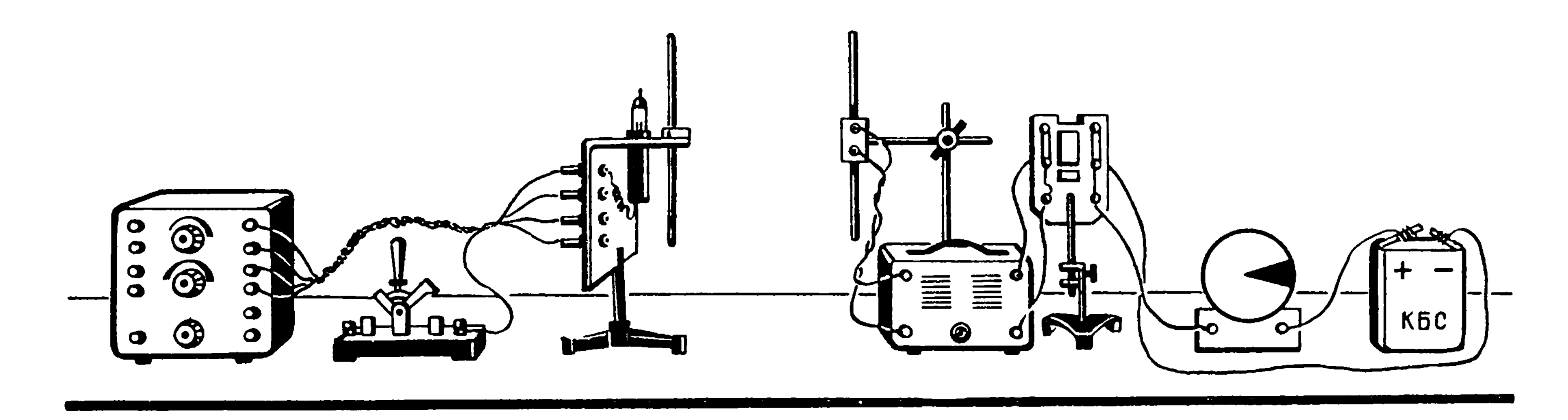


Рис. 181

ной приемника и поляризованным реле включают усилитель на полупроводниках (рис. 181) и повторяют опыт. Схема усилителя учащимся уже знакома из курса физики X класса.

Опыт 181. Радиолокация

Собирают установку, изображенную на рисунке 182. Включив генератор, замечают, что луч осциллографа прямолинеен. (Вместо осциллографа в качестве индикатора можно включить гальванометр.) Опыт свидетельствует, что приемник не воспринимает непосредственно излучение генератора.

Приводят в движение подвешенный металлический маятник, изготовленный в форме плоского макета самолета. Замечают, что при каждом пересечении «луча» генератора маятником стрелка гальванометра отклоняется. Опыт свидетельствует о приеме приемником отраженных от макета самолета волн.

Принцип радиолокации проще всего объяснить с помощью кинофильма того же названия. После демонстрации фильма целесообразно обсудить с учащимися вопрос о способах определения расстояния до объекта, вертикального угла и азимута. В фильме этот материал объяснен хорошо, но в быстром темпе.

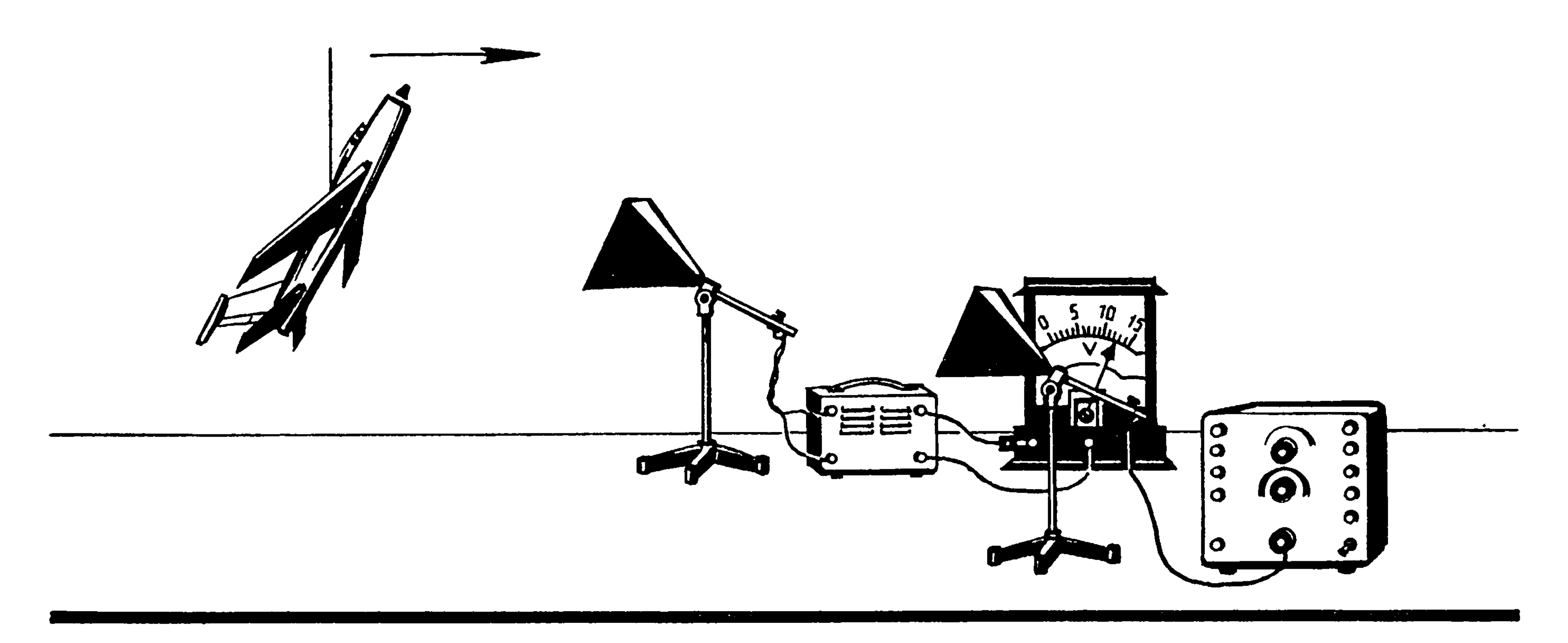


Рис. 182

Опыт 182. Детектирование модулированных сигналов

В связи с тем что в школьных кабинетах физики нет ультравысокочастотных осциллографов, процесс детектирования модулированных сигналов приходится показывать на колебаниях сравнительно низкой частоты. Для этого собирают генератор модулированных колебаний, с которым учащиеся познакомились при изучении модуляции колебаний. Выход этого генератора подключают через панель детекторной секции к осциллографу (рис. 79, 80).

Собрав установку, коротко напоминают учащимся процесс модуляции колебаний и демонстрируют амплитудно модулированный сигнал (рис. 183, *а*).

Далее сообщают, что из принятого модулированного сигнала необходимо выделить низкочастотный сигнал, несущий необходимую информацию. Процесс выделения сигнала, несущего информацию, называют детектированием, а элемент радиотехнического устройства, осуществляющий детектирование, называют детекторным каскадом.

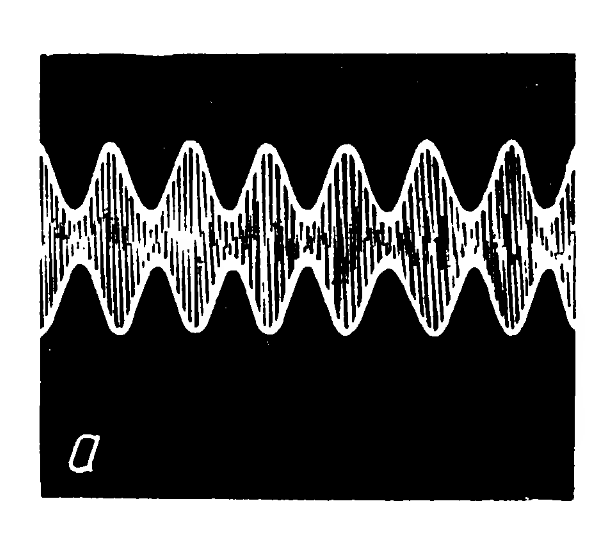
Одним из элементов этого каскада является полупроводниковый диод (детектор). Для того чтобы объяснить работу детекторного каскада, вынимают перемычку и вместо нее вставляют диод. На экране осциллографа наблюдают «срезанную» наполовину осциллограмму, состоящую из «половинок» синусоид (рис. 183, *б*).

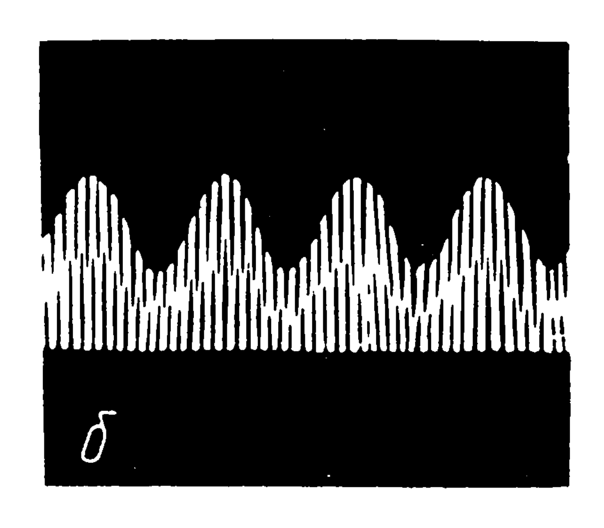
Параллельно нагрузочному резистору подключают конденсатор и на экране наблюдают выделенный низкочастотный сигнал (рис. 183, *в*).

Демонстрация получается более выразительной, если использовать электронный переключатель. В этом случае на один вход переключателя подается моделирующий сигнал от звукового генератора, а на другой — сигнал с детекторного каскада.

Опыт 183. Радиотелеграф

На демонстрационном столе собирают установку, изображенную на рисунке 184, *а*. Приемный диполь, усилитель и громкоговоритель устанавливают в конце аудитории. Объясняют, что с помощью звукового генератора и модуляционного трансформатора





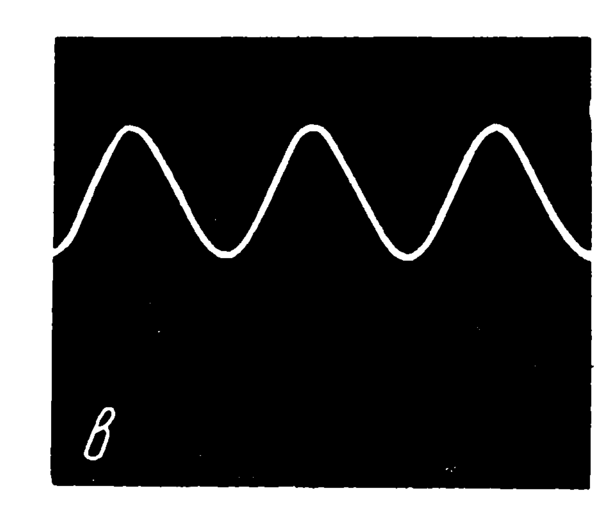


Рис. 183

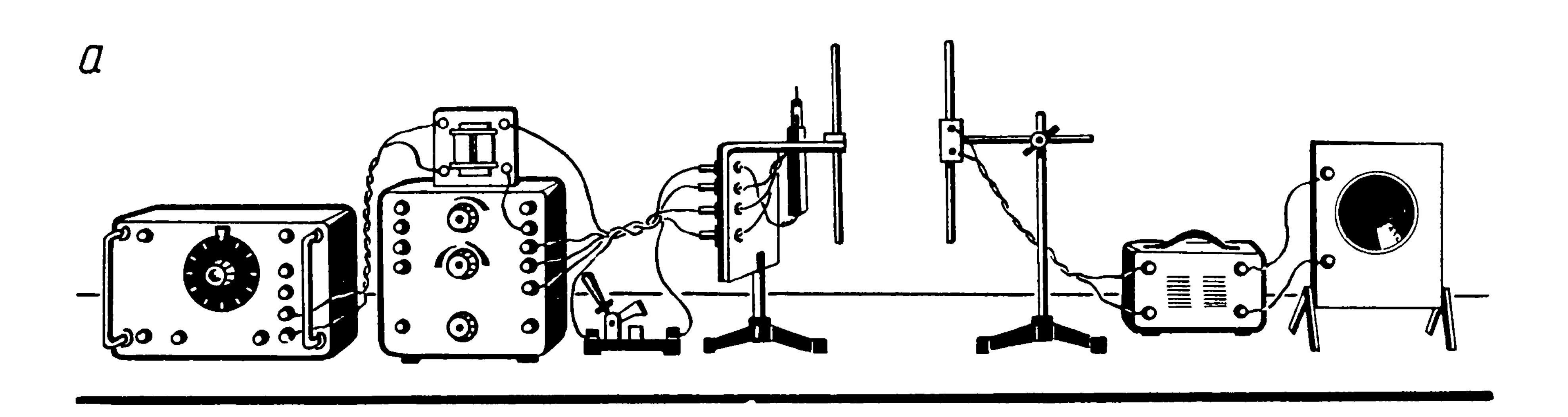


Рис. 184

осуществляется амплитудная модуляция электромагнитных колебаний генератора УВЧ. Напоминают принцип амплитудных модуляций, для чего на доске чертят блок-схему установки (рис. 184, *б* и *в*). (На рисунке 184, *б* показана схема соединения узлов в случае использования лампового генератора, а на рисунке 184, *в* — транзисторного.)

Через 30—40 с после включения установки приемник регистрирует принятый однотональный сигнал. Изменяя частоту колебаний,

генерируемых звуковым генератором, замечают изменение частоты принимаемого сигнала. Объясняют, что принятый сигнал детектируется, усиливается и подается на громкоговоритель.

Включают в анодную цепь телеграфный ключ. Манипулируя ключом, посылают телеграфный сигнал. На учащихся производит большее впечатление не простое замыкание и размыкание цепи, а посылка какой-либо конкретной радиограммы (например, передача слова «Герц» или «Попов»).

П о п о в

. — — . — — — . — — . — — — . — —

Г е р ц

— — . . . — . — . — .

Опыт 184. Радиотелефонная связь

В установке, описанной в предыдущем опыте, убирают телеграфный ключ и заменяют звуковой генератор проигрывателем (рис. 185). Рисуя на доске схему демонстрационной установки, объясняют принцип ее работы и назначение основных узлов. Обращают внимание учащихся на то, что в этом случае имеет место многотональная амплитудная модуляция.

Включив усилитель, проигрыватель и генератор, демонстрируют принцип радиотелефонной связи.

Анализируя поставленный опыт, сообщают, что если вместо проигрывателя включить микрофон и усилитель, то можно передавать «живую» речь.

Опыт 185. Устройство и принцип работы простейшего радиоприемника

Из деталей, имеющихся в кабинете физики, собирается простейший радиоприемник, изображенный на рисунке 186. Объяснив основные каскады приемника (входная цепь — антенна; приемный контур, детекторный каскад, усилитель звуковой частоты и громкоговоритель), включают усилитель и, изменяя электроемкость контура, настраиваются на радиостанцию.

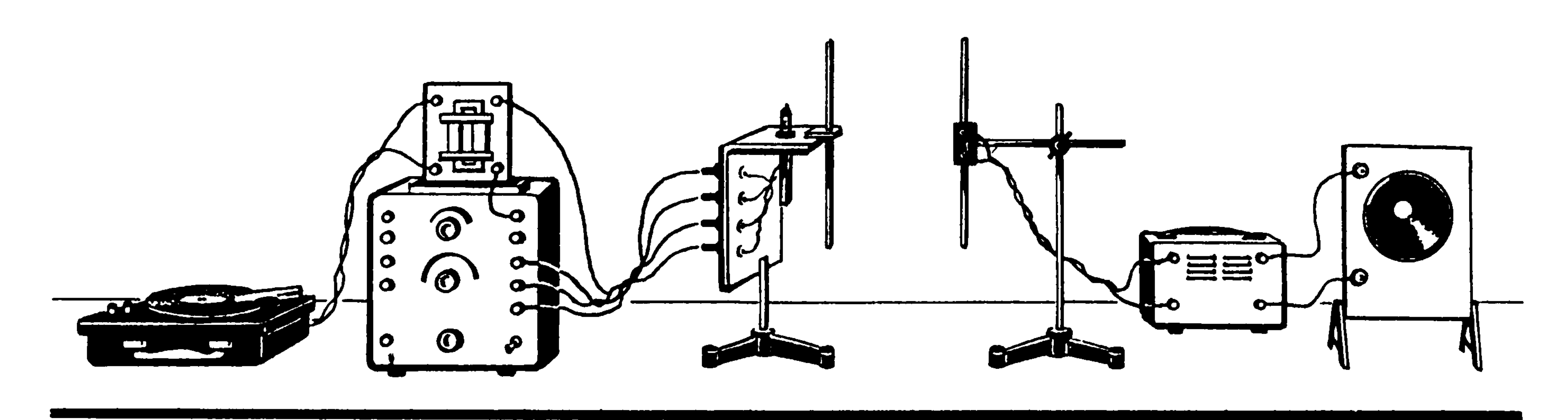


Рис. 185

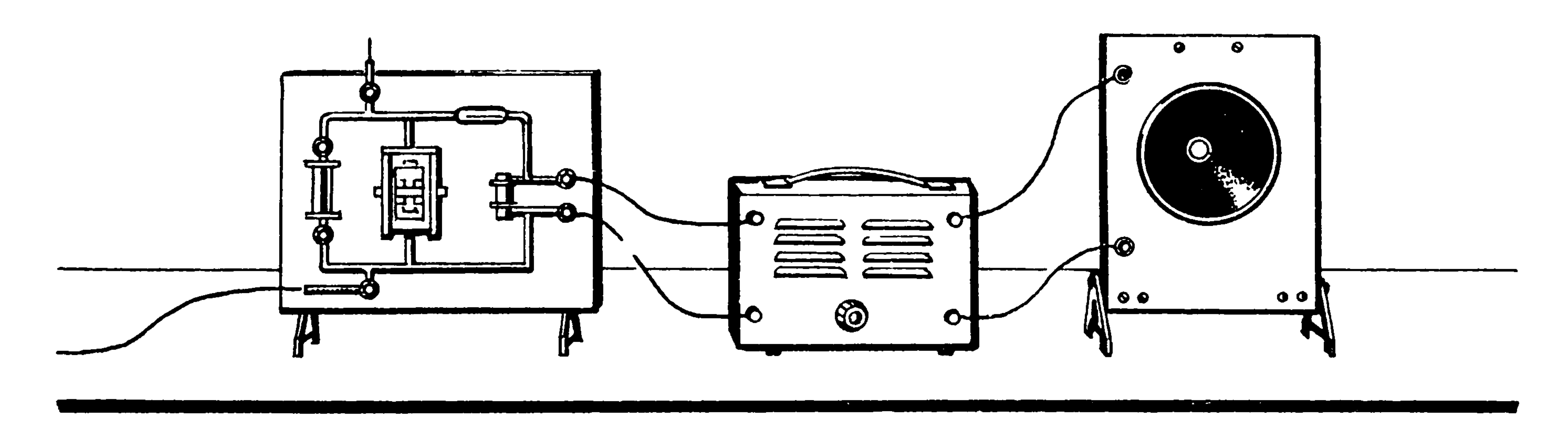


Рис. 186

Качество приема во многом зависит от расстояния до ближайшей радиостанции. Поэтому для приема далеко расположенной радиостанции важное значение имеет устройство антенны и заземление.

Опыт 186. Передача информации на расстояние с помощью лазера

Установка для демонстрации передачи информации на расстояние с помощью лазера изображена на рисунке 187, *а*.

На одном конце демонстрационного стола располагают лазер, звуковой генератор, а на другом конце — усилитель низкой частоты и громкоговоритель. На пути лазерного луча на расстоянии 10—15 см располагают модулятор.

К. К. Ермакович и Ф. К. Гонсалес предложили простое приспособление для модуляции лазерного излучения (см.: Ермакович К. К., Гонсалес Ф. К. Модулятор лазерного излучения // Физика в школе.—1985.—№ 2; Ермакович К. К., Гонсалес Ф. К. Пьезооптический модулятор // Физика в школе.—1984.—№ 2).

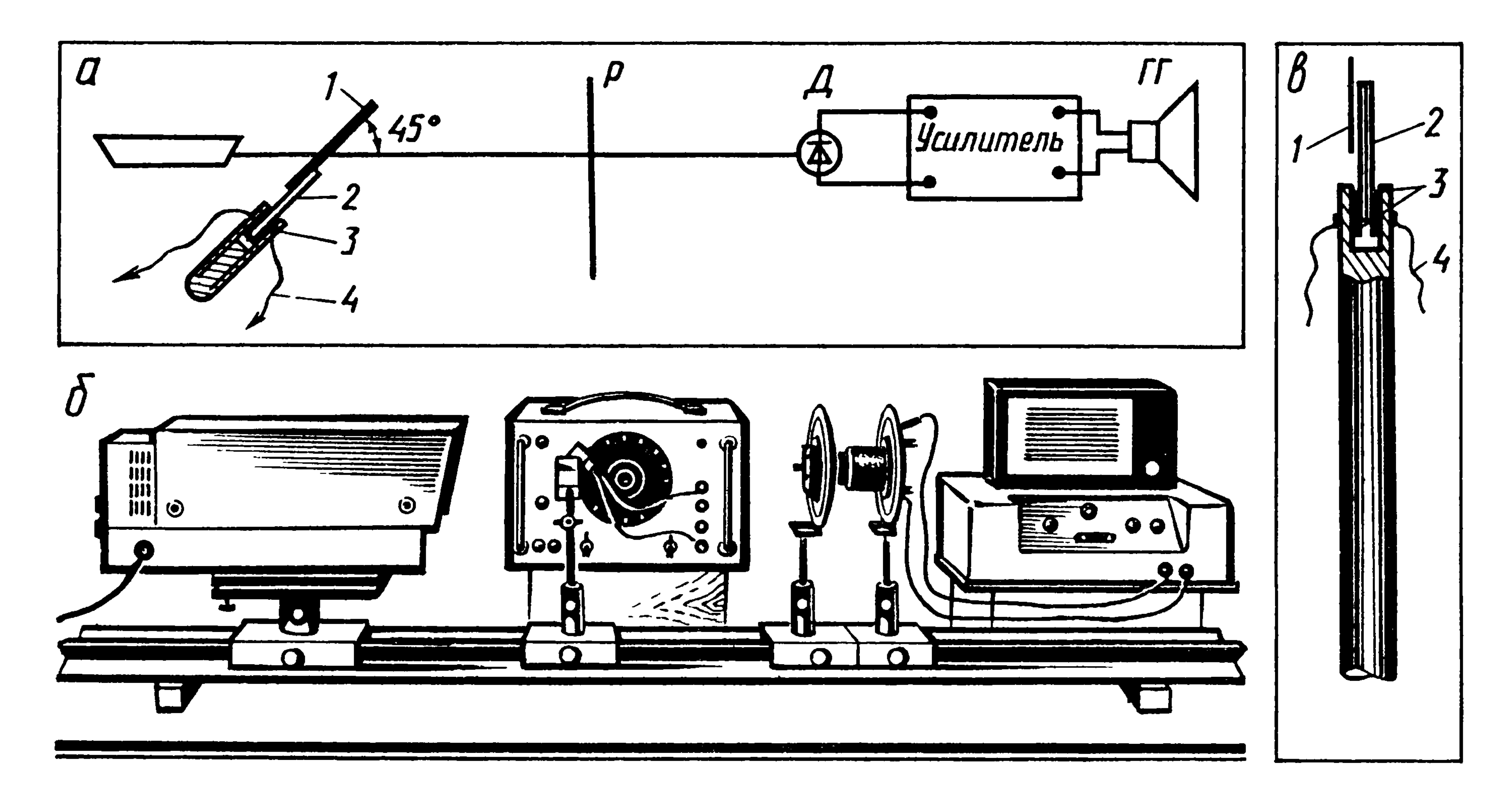


Рис. 187

Приспособление состоит из пьезокристалла *1*, применяемого в бытовых электрофонах (рис. 187, *в*), к верхней части которого приклеена прямоугольная тонкая пластинка *2* размером приблизительно 3×6 мм, вырезанная из оптически анизотропного материала (целлофан, слюда и др.). Нижняя часть пьезокристалла укреплена в держателе *3*, к контактным зажимам *4* которого припаяны проводники для подключения к источнику модулирующего напряжения.

Для демонстрации опыта по модуляции лазерного излучения собирается установка (рис. 187, *б*), схема которой показана на рисунке 187, *а*. Приспособление для модуляции лазерного излучения, подключенное к звуковому генератору, и поляроид *Р* образуют модулятор. Приемником является фотодиод, усилитель и громкоговоритель. В качестве приемника можно использовать усилитель от кинопроекционного аппарата «Украина». В этом случае луч лазера надо направить в окно светоприемника.

Принцип работы установки можно объяснить следующим образом. Напоминают учащимся о том, что свет лазера поляризован. Поворачивая поляроид, подтверждают сказанное.

Далее объясняют, что при прохождении света через оптически анизотропную пластину плоскость поляризации луча изменится, а это приведет к тому, что световой поток через поляроид *Б* изменится. Изменится и сила тока фотоприемника. Для подтверждения этого подключают на вход усилителя вольтметр с дополнительным резистором «15 В» и, пересекая луч лазера кусочком целлофана или слюды, замечают изменение в показаниях вольтметра.

Подключают пьезокристалл к звуковому генератору, а на выход усилителя подключают громкоговоритель. Включив усилитель, обращают внимание учащихся на то, что громкоговоритель молчит. Включив генератор звуковой частоты, обнаруживают звучание громкоговорителя. Изменяя частоту колебаний напряжения звукового генератора, наблюдают изменение частоты принимаемых сигналов.

Объясняют, что сочетание оптически анизотропной пластины, подключенной к источнику модулирующего напряжения, и поляроида позволило модулировать амплитуду светового потока.

Оптимальные условия для демонстрации подбирают до урока, вращая поляроид.

Раздел II. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

§ 13. Тепловое и ультрафиолетовое излучения

Опыты 187—191. Приемники теплового излучения

Учащиеся хорошо знают, что любое нагретое тело излучает тепло. Назначение описываемого опыта — познакомить их с приемниками теплового излучения.

1. К любому источнику теплового излучения, например к электроплитке со скрытой спиралью или электрическому утюгу, подносят закрытый металлический сосуд, соединенный с жидкостным манометром (см. рис. 90). Замечают, что при этом уровни жидкости в коленах манометра изменяются. Опыт свидетельствует, что такой сосуд может служить приемником тепла. Демонстрируют, что чувствительность прибора выше, когда он обращен к нагретому телу черной стороной.

2. Опыт повторяют с термобатареей, соединенной с усилителем постоянного тока, на выход которого подключен демонстрационный гальванометр.

Вместо демонстрационного гальванометра и усилителя постоянного тока можно использовать зеркальный гальванометр.

3. Повторяют опыт, используя в качестве приемника теплового излучения фотоэлемент ФЭК-1 или ФЭСС-У10, соединенный длинными проводниками с усилителем к демонстрационному гальванометру или с зеркальным гальванометром. Шкалу прибора, если используется усилитель постоянного тока, надо осветить осветителем для теневого проецирования. Замечают отклонение стрелки гальванометра.

4. Фоторезистор ФСД-Г1 или ФЭС-1 включают по схеме, изображенной на рисунке 188. Поднося фоторезистор к сильно нагретому телу, например к утюгу или плитке, замечают отклонение стрелки гальванометра.

5. В качестве приемника теплового излучения можно использовать германиевый фотодиод. Фотодиоды обладают рядом преиму-

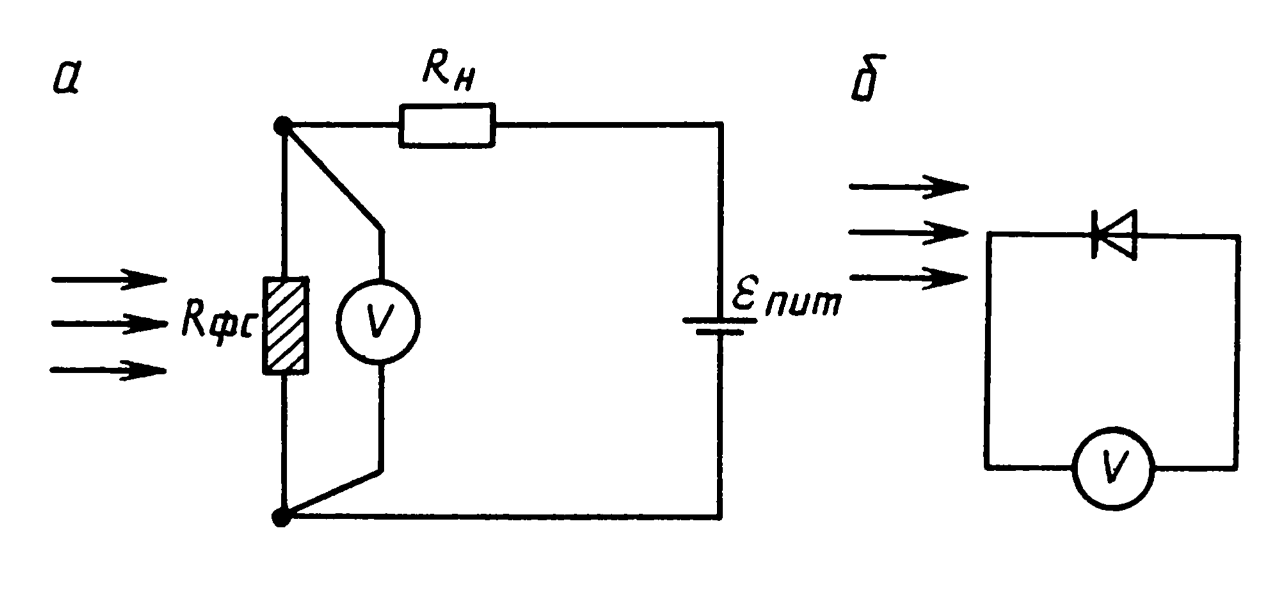


Рис. 188

ществ перед другими приемниками: а) у них самая большая интегральная чувствительность (20 мА/лм); б) их можно использовать без посторонних источников тока; в) малая инерционность. Фотодиод либо подключают непосредственно к зеркальному гальванометру, либо через усилитель постоянного тока к демонстрационному гальванометру.

6. В современной лабораторной технике для обнаружения инфракрасного излучения широко используют фотоэлектронные умножители. В школах, где нет фотоэлектронных умножителей, можно использовать фотоумножитель с усилителем от старого кинопроекционного аппарата «Украина-4» или еще более ранних выпусков этого аппарата. В этом случае поток инфракрасного излучения надо направить на входное отверстие фотоумножителя, а на выход подключить демонстрационный усилитель. Вольтметр следует включить с дополнительным резистором, рассчитанным на 15 В.

Опыт 192. Обнаружение инфракрасного излучения в сплошном спектре нагретого тела

На экране способом, описанным в опыте 163, получают сплошной спектр света, испускаемого нитью накала проекционной лампы. Перед получением спектра из осветителя вынимают теплофильтры. Опыт лучше ставить с призмой прямого зрения, проецируя спектр на прозрачный (матовый) экран. Расположение приборов на демонстрационном столе показано на рисунке 189.

Вносят в красную часть спектра на расстоянии примерно 50 см от объектива приемник инфракрасного излучения (фотоэлемент ФЭК-1, ФЭСС-У10, или фоторезистор ФСД-Г1, или фотодиод ФД-7), укрепленный на длинной ручке. На экране видно, что тень от приемника теплового излучения находится в красной части спектра. Обращают внимание учащихся на положение стрелки гальванометра.

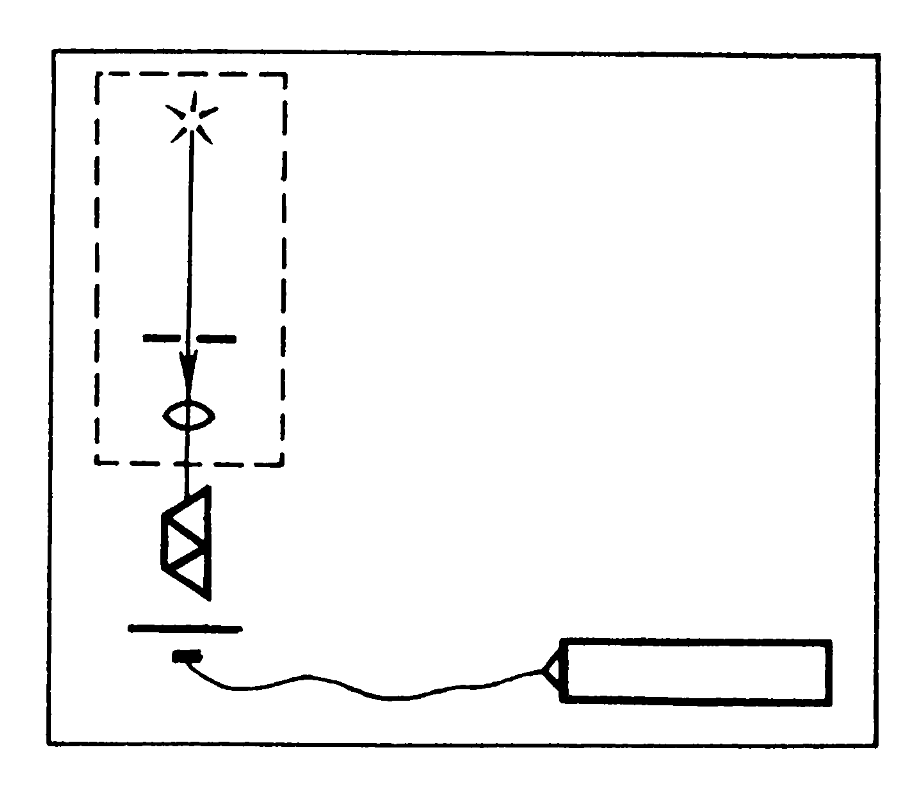


Рис. 189

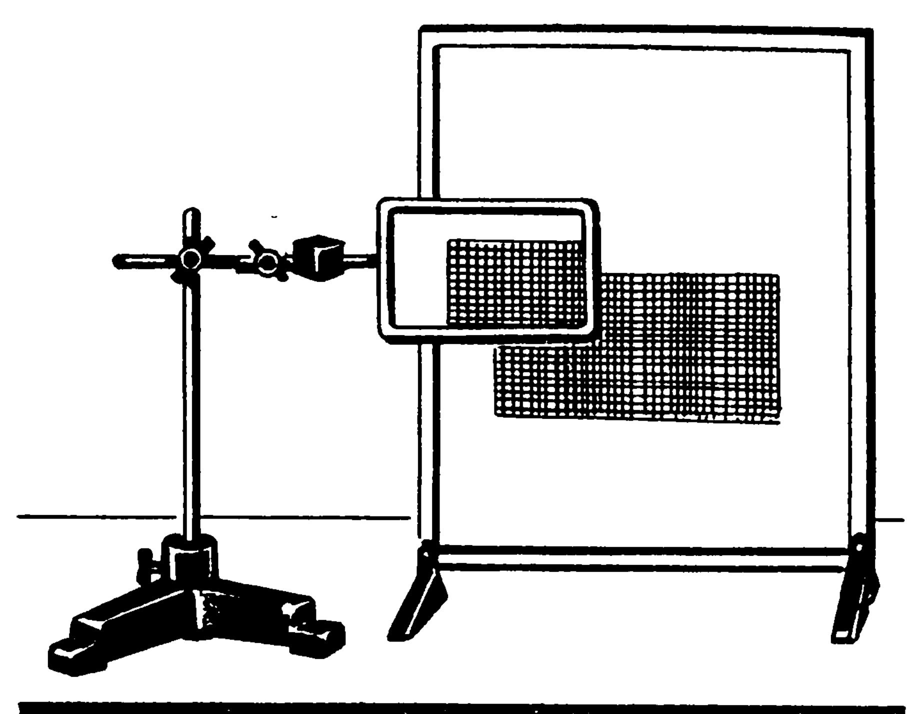


Рис. 190

Переносят приемник тепла за красную часть спектра. Стрелка гальванометра также отклоняется. Опыт свидетельствует, что за красной частью спектра обнаружены электромагнитные волны с длиной большей, чем длина волн красного света. Вводят термин «инфракрасное излучение».

Опыт 193. Определение длины волны инфракрасного излучения

Вынув из осветителя тепловой фильтр, собирают установку для получения дифракционного спектра (см. рис. 160). Чувствительный приемник теплового излучения (например, фотодиод ФД-7; или фоторезистор ФСД-Г1, или фотоэлемент ФЭК-1, или ФЭСС-У10) вносят в первую темную полосу дифракционного спектра (место для приемника инфракрасного излучения должно быть определено до урока в процессе настройки опыта).

Измерив расстояние x от середины центральной светлой полосы до местоположения приемника и расстояние l от дифракционной решетки до экрана, зная постоянную решетки, определяют длину волны инфракрасного излучения.

Опыт 194. Принцип работы инфракрасной лампы

Целью опыта является ознакомление учащихся с использованием инфракрасного излучения в медицине.

Медицинская инфракрасная лампа состоит из штатива и рефлектора, в центре которого расположен нагревательный элемент в виде спирали, навитой на керамическом основании.

Для демонстрации опыта собирают установку, изображенную на рисунке 190.

На пути инфракрасных лучей, испускаемых лампой, помещают термостолбик, соединенный с гальванометром. С помощью автотрансформатора плавно изменяют напряжение лампы. При этом растет показание гальванометра. Учащимся сообщают, что лампа, применяемая в медицине, испускает коротковолновые инфракрасные лучи, а ее спираль нагревается до температуры 400—500 °С.

Опыт 195. Обнаружение ультрафиолетового излучения

Цель опыта — показать, что за фиолетовой частью сплошного спектра имеется невидимое излучение более коротких длин волн.

Установка для демонстрации опыта изображена на рисунке 189.

Чтобы получить яркий и четкий спектр, насыщенный ультрафиолетовыми лучами, в качестве источника света применяют осветитель УФО-1, или любой другой с ртутно-кварцевой лампой, или осветитель от проекционного аппарата «Свитязь». Для уменьшения поглощения ультрафиолетовых лучей в объективе оставляют только одну линзу и применяют призму из органического стекла или

стекла «Флинт». Для выделения узкого пучка света между источником света и объективом располагают диафрагму. В качестве индикатора используют экран для обнаружения ультрафиолетовых лучей или любой люминесцирующий экран.

Люминесцирующий экран располагают перед белым экраном со сплошным спектром так, чтобы его нижний правый угол перекрывал верхнюю часть фиолетовой области спектра. При этом наблюдают свечение экрана не только в видимой области, но и за пределами фиолетового участка спектра (см. рис. 190), что позволяет сделать вывод о существовании электромагнитных волн с длиной волны меньшей, чем длина волны фиолетового света.

Затем, помещая на пути ультрафиолетовых лучей приемник ультрафиолетового излучения (фотодиод, фотоэлемент или фоторезистор), соединенный с проекционным гальванометром (или через усилитель постоянного тока с демонстрационным стрелочным гальванометром), обнаруживают в темной полосе за фиолетовой частью спектра ультрафиолетовое излучение. Расположение этого излучения в сплошном спектре дает основание утверждать, что длины волн этого излучения меньше длин волн фиолетовой части спектра.

§ 14. Фотоэлектрический эффект

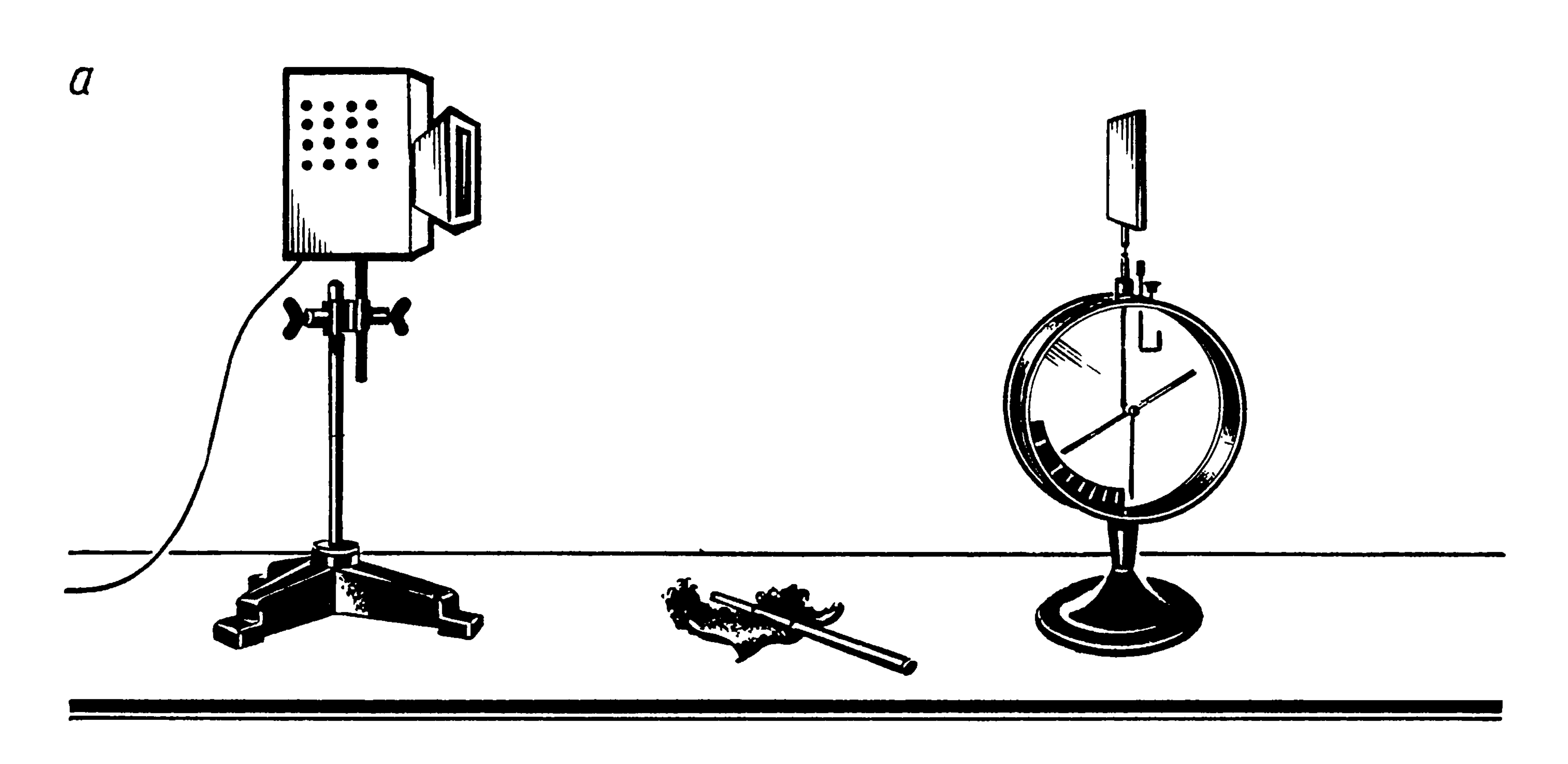
Во всех описанных в этом параграфе опытах необходимо использовать источник света, содержащий ультрафиолетовое излучение (электрическая дуга, ртутно-кварцевая лампа или, что хуже, металлогалогенная лампа). В последнее время для школ начали выпускать специальный ультрафиолетовый осветитель УФО-1 и комплект приборов по фотоэффекту КПФ-1.

Однако ниже описаны опыты не с этими приборами, а с теми, что есть в большинстве школ. Опыты с новыми приборами (УФО-1 и КПФ-1) ставятся аналогично.

Опыт 196. Обнаружение внешнего фотоэффекта

Опыт проводится на установке, изображенной на рисунке 191.

На демонстрационном столе располагают источник света, излучающий преимущественно ультрафиолетовые лучи. Таким источником могут быть ультрафиолетовый осветитель УФО-1, металлогалогенная, или ртутно-кварцевая лампа, или электрическая дуга. На небольшом расстоянии от источника ультрафиолетовых лучей располагают зачищенную с одной стороны до блеска цинковую пластину, установленную на электрометр. Пластину заряжают положительным зарядом. Обращают внимание учащихся на показание стрелки электрометра. После этого включают источник ультрафиолетового излучения. Отмечают, что показание стрелки электрометра при этом не меняется, что свидетельствует об отсутствии



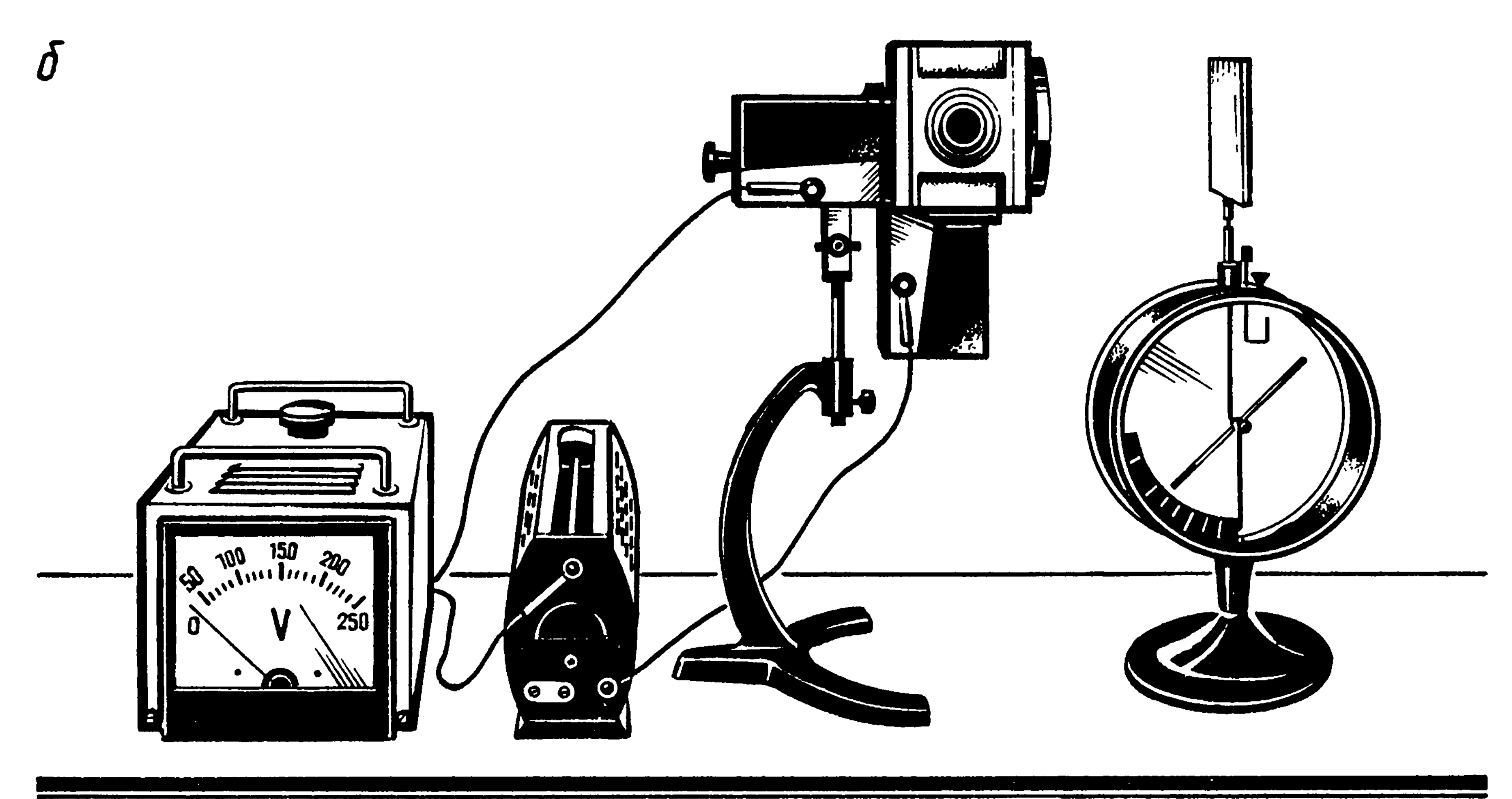


Рис. 191

разряда электрометра. Затем пластину заряжают отрицательным зарядом и облучают ультрафиолетовыми лучами. При этом происходит быстрый разряд электрометра. Объясняют причины происходящих явлений и вводят понятие о внешнем фотоэффекте.

Поместив на пути световых лучей обыкновенное стекло, сильно поглощающее ультрафиолетовые лучи, снова заряжают электрометр отрицательным зарядом. При этом электрометр не разряжается, каким бы интенсивным ни был световой поток. Делают вывод о том, что фотоэффект вызывается светом определенной длины волны.

На этой же установке показывают зависимость внешнего фотоэффекта от рода вещества. Для этого на стержень электроскопа устанавливают поочередно одинаковой формы и размеров цинковую, алюминиевую и медную пластины. Их заряжают отрицатель-

ным зарядом до одинакового потенциала, а затем облучают светом от электрической дуги. Время разряда в каждом случае измеряют демонстрационным секундомером. При одинаковом осветителе цинковая пластина разряжается быстрее, чем алюминиевая. Медленнее всех разряжается медная пластина. Делают вывод о том, что явление фотоэффекта наблюдается на различных металлах, каждый из которых имеет определенную работу выхода.

Опыт 197. Законы внешнего фотоэффекта

Для иллюстрации проявления законов фотоэффекта собирают установку по рисунку 192.

На демонстрационный стол устанавливают осветитель для теневого проецирования и любой (СЦВ-4, СЦВ-5, ЦВ-4, ЦВ-3, ЦВ-1) вакуумный фотоэлемент. Для получения светового потока, падающего на фотоэлемент, осветитель включают в электрическую сеть через автотрансформатор. Фотоэлемент включают в цепь по схеме, изображенной на рисунке 193, *а*. Его тщательно изолируют от постороннего света и в дальнейшем положение не меняют. Гальванометр включают через усилитель постоянного тока.

Ознакомив учащихся с устройством фотоэлемента по таблице «Фотоэлемент», приступают к демонстрации опыта в полузатемненном классе. Включают осветитель для теневого проецирования.

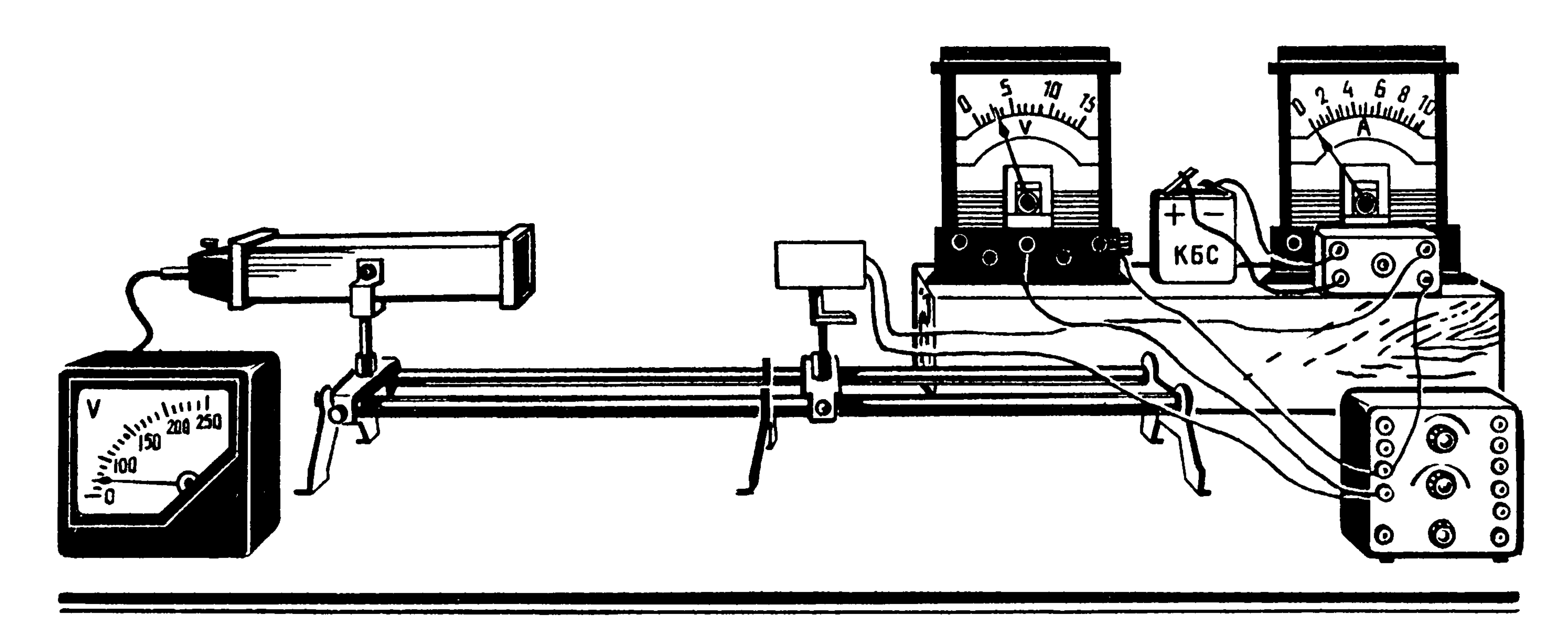


Рис. 192

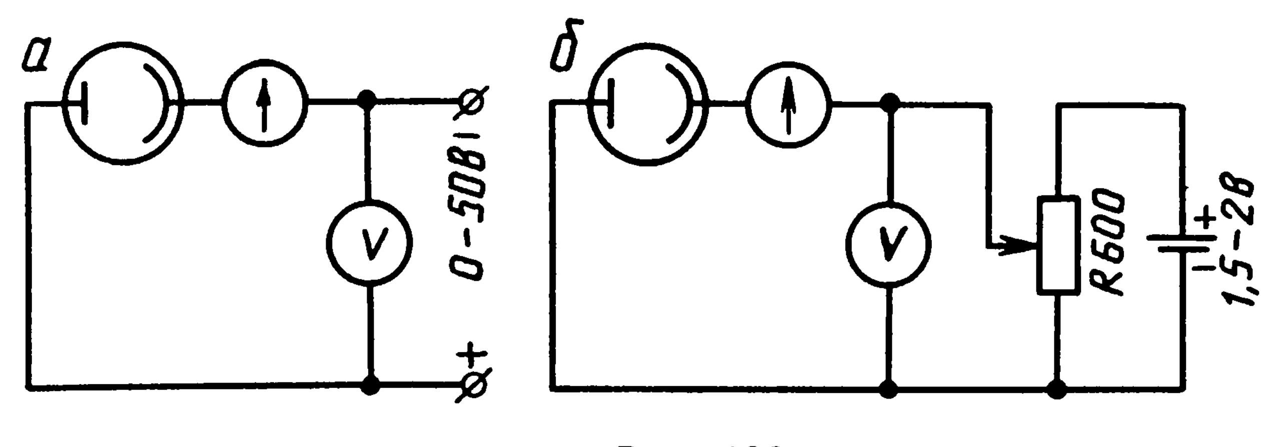


Рис. 193

С помощью потенциометра постепенно увеличивают напряжение между электродами фотоэлемента. Для каждого значения напряжения отмечают силу фототока и записывают на доске. С повышением напряжения растет и сила тока, но в некоторый момент времени достигает постоянного значения. Этот ток называется током насыщения, который определяется числом электронов, испускаемых катодом за единицу времени при фиксированном световом потоке.

Далее, увеличивая напряжение питания осветителя, увеличивают световой поток. Повторив опыт при втором фиксированном световом потоке, показывают, что с увеличением светового потока прямо пропорционально растет ток насыщения.

Обращают внимание учащихся на то, что при отключении напряжения фототок полностью не исчезает. Для того чтобы фототок стал равным нулю, можно приложить такое задерживающее напряжение, чтобы электроны, обладающие при вылете из катода наибольшей скоростью, не могли преодолеть задерживающее электрическое поле и достигнуть анода. В этом случае можно написать

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_з, \qquad (1)$$

где m — масса электрона; e — заряд электрона; $v_{\max}$ — максимальная скорость; $U_з$ — задерживающее напряжение.

Для определения максимальной скорости электронов на фотоэлемент с потенциометра подают напряжение обратной полярности (рис. 193, *б*).

К вольтметру присоединяют дополнительный резистор сопротивлением, соответствующим измеряемому напряжению. Установив на электродах фотоэлемента с помощью потенциометра напряжение, равное нулю, включают осветитель. В оправу осветителя устанавливают оранжевый светофильтр. Чувствительный демонстрационный гальванометр показывает небольшую силу тока. При увеличении задерживающего напряжения ток постепенно убывает до нуля. Это свидетельствует о том, что электроны при вылете из катода, обладающие наибольшей скоростью, не могут преодолеть задерживающее поле. Таким образом, измерив задерживающее напряжение, по уравнению (1) можно определить максимальную скорость фотоэлектронов:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2eU_з}{m}}.$$

Затем опыт повторяют со светофильтрами других цветов. Обращают внимание учащихся на то, что с увеличением частоты света также увеличивается тормозящая разность потенциалов.

Не меняя светофильтр, определяют тормозящее напряжение при другом значении светового потока. Приходят к выводу, что тормозящее напряжение не зависит от светового потока.

Из результатов этого и предыдущих опытов делают выводы, подтверждающие уравнение Эйнштейна.

Опыт 198. Обнаружение внутреннего фотоэффекта и демонстрация работы фоторезистора

До демонстрации опыта с помощью настенной таблицы знакомят учащихся с устройством фоторезистора.

Для демонстрации действия фоторезистора собирают установку, схема которой изображена на рисунке 194. В отсутствие света, падающего на фоторезистор, с помощью потенциометра устанавливают такое напряжение, при котором гальванометр не показывает ток. Затем включают лампу. При этом гальванометр показывает наличие тока, что свидетельствует об уменьшении сопротивления в цепи. Плавно изменяя накал нити лампы с помощью автотрансформатора, наблюдают изменение силы тока в цепи фоторезистора. Затем, оставляя освещенность фоторезистора постоянной, постепенно увеличивают приложенное к нему напряжение. Отмечают, что при этом растет сила тока.

Опыт 199. Демонстрация принципа работы фотоэлемента

Для демонстрации опыта собирают установку, изображенную на рисунке 195. Подобрав соответствующий дополнительный ре-

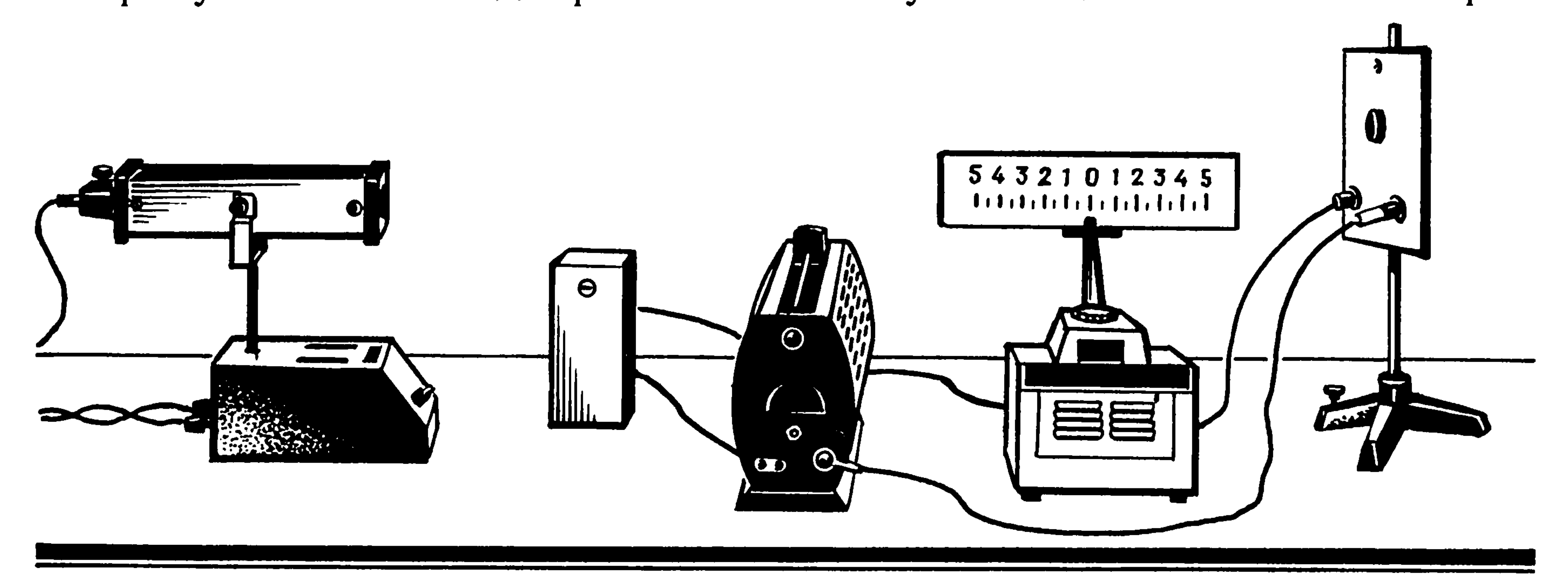


Рис. 194

Рис. 195

зистор к демонстрационному вольтметру, подключают его к клеммам фотоэлемента. Вольтметр показывает наличие фотоЭДС.

Закрывая фотоэлемент от света, замечают, что стрелка вольтметра возвращается в нулевое положение. Затем соединяют два фотоэлемента последовательно и убеждаются, что при их освещении ЭДС увеличивается в 2 раза. Объясняют принцип работы солнечных батарей, КПД которых достигает 10—12%. В солнечных батареях происходит прямое преобразование энергии солнечного излучения в электрическую.

После этого демонстрируют зависимость силы фототока от падающего светового потока. Для этого составляют электрическую цепь, состоящую из фотоэлемента, низкоомного реостата и демонстрационного гальванометра. Светочувствительный слой фотоэлемента освещают лампой накаливания. Изменяя расстояние от лампы до фотоэлемента, изменяют падающий на него световой поток. При этом пропорционально изменяется сила фототока. Такая зависимость используется для точного определения освещенности с помощью люксметра.

Опыты 200—201. Демонстрация принципа работы фотореле

1. Для демонстрации принципа работы фотореле с вакуумным фотоэлементом собирают установку в соответствии с рисунком 196, *а*.

Любой фотоэлемент устанавливают в кожухе, предохраняющем его от посторонней засветки. Выводы от фотоэлемента присоединяют к стандартному усилителю постоянного тока. На выход усилителя подключают любое чувствительное реле из числа имеющихся в кабинете (например, РП-4). Реле включают в цепь маломощной электрической лампы, питаемой от источника низкого напряжения. Включают осветитель для теневого проецирования. Направив луч света на фотоэлемент, обнаруживают срабатывание реле.

Если в кабинете нет усилителя постоянного тока, установку можно собрать, используя «транзистор на панельке» и поляризованное реле (рис. 196, *б*). Наконец, если и этих приборов нет, установку можно собрать, используя старое демонстрационное фотореле (рис. 196, *в*).

2. Для демонстрации опыта собирают установку в соответствии с рисунком 197. На демонстрационном столе устанавливают действующую модель фотореле с фоторезистором, осветитель для теневого проецирования и универсальный двигатель, на оси которого укрепляют диск. Двигатель подключают к нормально разомкнутым контактам электромагнитного реле. На входные клеммы подают напряжение 127—220 В. Если фоторезистор не освещен, то ток в управляющей цепи недостаточен для срабатывания реле. Его контакты остаются в начальном положении. Включают осветитель для теневого проецирования и световой пучок направляют на фоторезистор. При этом сила тока в управляющей цепи резко возрастает и реле переключает контакты в исполнительной цепи.

Рис. 196

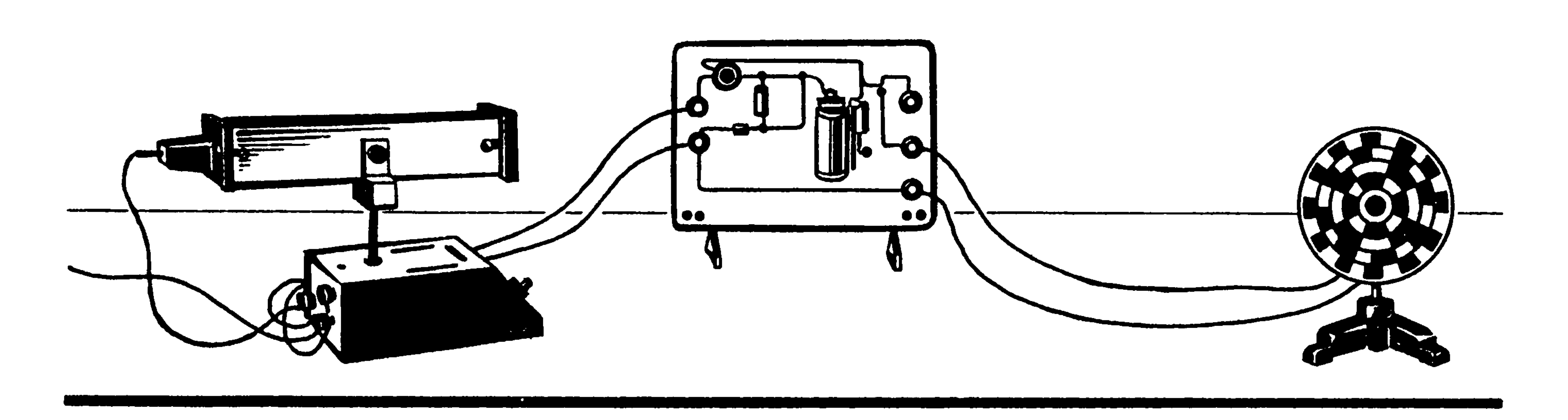


Рис. 197

Наличие в электромагнитном реле нормально замкнутых и разомкнутых контактов позволяет использовать его в разных режимах.

Так, например, для демонстрации принципа автоматически действующей установки для зажигания освещения надо исполнительную цепь включить к тем контактам, которые замыкаются при затемнении фоторезистора. Эта же схема используется в работе автомата для предотвращения аварии. Например, фотореле почти мгновенно останавливает мощный пресс, если рука человека оказывается в опасной зоне, закрыв световой пучок, идущий на фотоэлемент.

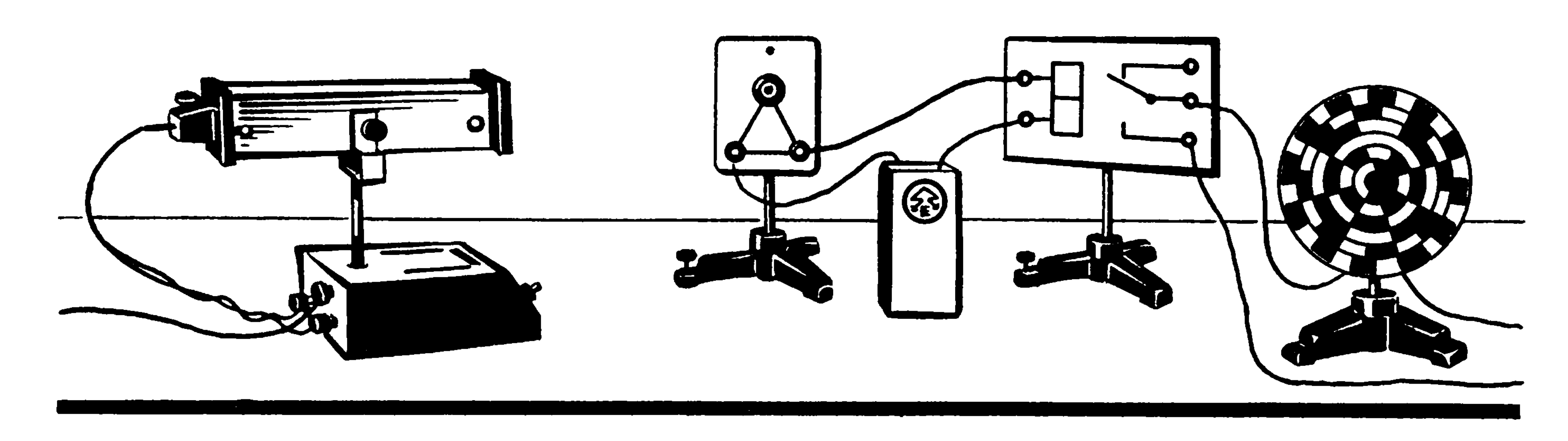


Рис. 198

Для простейшего фотореле используют фоторезистор ФСД-Г1 и поляризованное реле РП-5 на подставке (рис. 198).

Составляют управляющую цепь из источника тока, фоторезистора, поляризованного реле и однополюсного выключателя. Подключая исполнительную цепь с лампой накаливания либо к нормально замкнутым, либо к разомкнутым контактам, демонстрируют зажигание лампы при освещении фоторезистора или при затемненном фоторезисторе.

Опыт 202. Использование фотореле для контроля уровня жидкостей и сыпучих веществ

В установке, использованной в опыте 200 или 201, между осветителем для теневого проецирования и фотоэлементом располагают пустой химический стакан. Свет при этом свободно проходит через стекло и попадает на фотоэлемент. Лампа в исполнительной цепи, включенная к нормально разомкнутым контактам реле, не горит. Затем в стакан медленно наливаем подкрашенную воду. При определенном уровне вода закроет доступ света к фотоэлементу, и фотореле включит сигнальную лампу. Аналогично фотореле сигнализирует о понижении уровня воды до определенной высоты. В опыте можно использовать вместо воды любые сыпучие вещества.

Опыт 203. Фотореле с программным управлением

Для демонстрации принципа работы фотореле с программным управлением необходимо собрать установку, описанную в опыте 200 (см. рис. 196). Перед фотоэлементом располагают лентопротяжный механизм от установки для демонстрации принципа магнитной записи звука или, что лучше, самодельную установку, изображенную на рисунке 199.

Самодельная кассета с расстоянием между боковыми стенками 37—40 мм укрепляется на оси, зажатой в зажим универсального штатива. На эту кассету перед демонстрацией опыта свободно наматывается лента шириной 35 мм, склеенная из прозрачной кинопленки и непрозрачной для света плотной бумаги.

Приемная кассета укрепляется на оси двигателя ДСД-2, совершающей 2 об/мин. Диаметр вала этой кассеты определяет протяженность прозрачных и непрозрачных кусков ленты. При диаметре вала 30—40 мм длина этих кусков должна быть не менее 10 мм и не больше 20 мм. В этом случае за 1 мин может произойти от 5 до 10 включений. Длину прозрачных кусков можно сделать одинаковой, а длину непрозрачных кусков разной. Включив лентопротяжный механизм и осветитель, наблюдают вспышки лампы.

Если в школе нет усилителя постоянного тока, установку можно собрать с помощью «транзистора на панельке» (рис. 196, *б*), а если нет ни усилителя постоянного тока, ни транзистора, то установку можно собрать по рисунку 196, *в*.

Опыт 204. Воспроизведение звука с кинопленки

Для демонстрации воспроизведения оптической фонограммы можно воспользоваться комплектом приборов, разработанных для этой цели известным методистом Л. И. Анциферовым (см.: Физика в школе.—1964.—№ 6). Комплект состоит из лентопротяжного устройства (рис. 200), аналогичного описанному в опыте 203, но двигатель ДСД-60 совершает 60 об/мин (этим обеспечивается довольно высокое качество звуковоспроизведения). Двигатель укреплен на обратной стороне панели и не виден учащимся.

Фотоэлектрический преобразователь состоит из газонаполненного фотоэлемента типа ЦГ-3, осветителя (лампочка для карманного фонаря) и цилиндрической линзы, выточенной из плексигласа. Нить накаливания лампочки располагается параллельно оси цилиндрической линзы. Изображение нити проецируется на фонограмму киноленты, которая скользит по направляющему полуцилиндру, имеющему отверстие для прохождения светового пучка.

Напряжение на фотоэлемент подается от заряженного до 200—300 В электролитического конденсатора С емкостью 20 мкФ (он вставляется в специальную обойму, расположенную на панели). Для ограничения тока разряда конденсатора в цепь фотоэлемента включен постоянный резистор сопротивлением 3,0 МОм. Одного заряда конденсатора достаточно для воспроизведения звука в течение 5—7 мин.

Натяжной ролик может свободно вращаться в металлической скобе. К последней прикреплена упругая пластинка-держатель. Пластинка обеспечивает равномерное натяжение ленты при ее движении.

Кусок ленты с записью склеивается в кольцо. Включение приборов проводится в следующей последовательности: усилитель звуковой частоты, осветитель, конденсатор, лентопротяжный механизм.

Включая последовательно выпрямитель ВУП, усилитель и микродвигатель, демонстрируют воспроизведение звука с кинопленки. При необходимости скорость движения кинокольцовки регулируют реостатом, включенным последовательно с микродвигателем. При

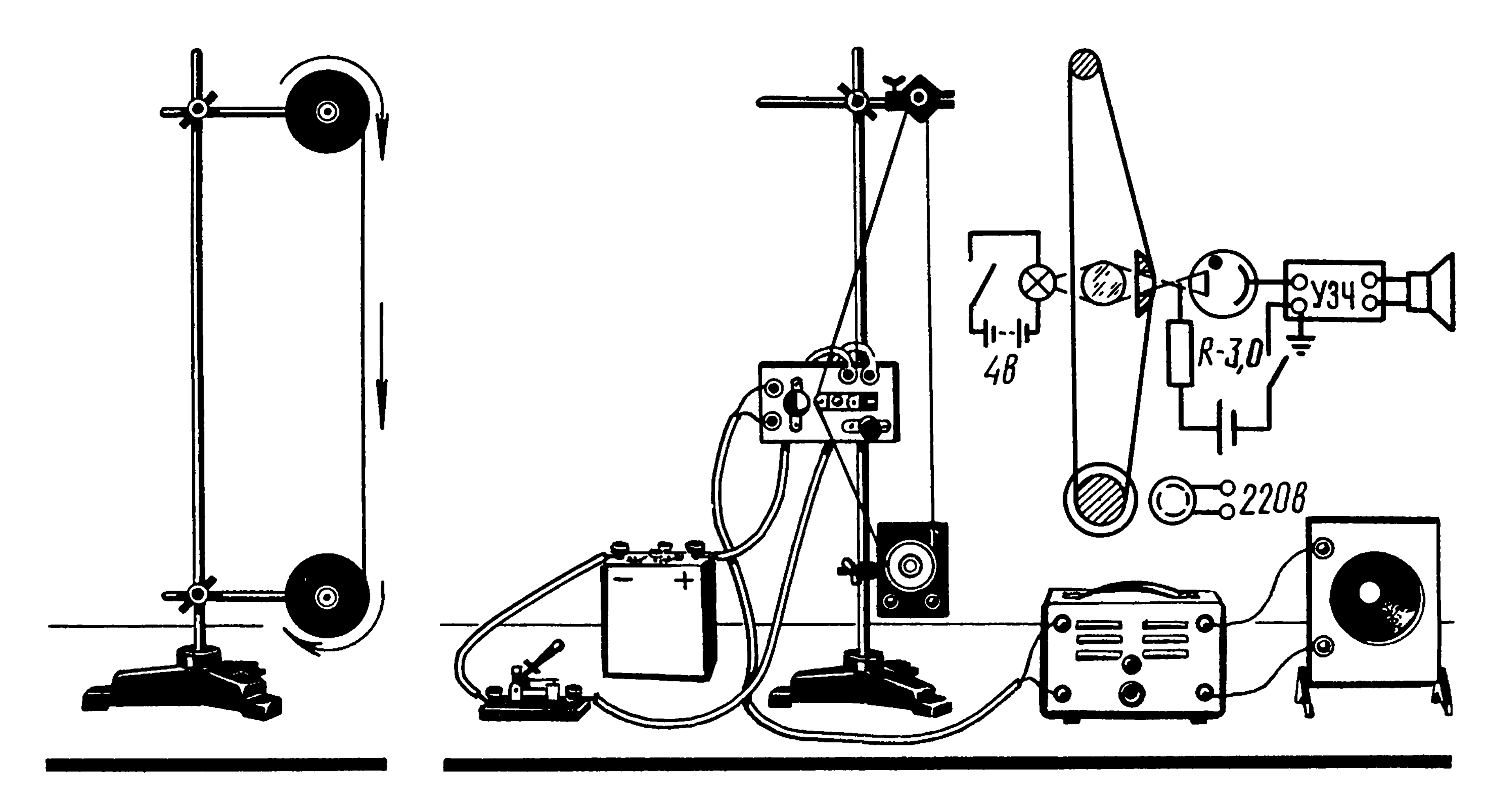


Рис. 199 Рис. 200

объяснении процесса воспроизведения звука, записанного оптическим способом, пользуются таблицей «Схема оптического воспроизведения звука». Можно также показать пятый фрагмент из учебного кинофильма «Фотоэлементы и их применение».

Опыты 205—206. Фотохимические реакции

Под действием света происходят разнообразные химические процессы: фотосинтез (превращение поглощенной световой энергии в организме в химическую, необходимую для его роста), реакция полимеризации (преобразование молекул исходного вещества в более сложные молекулы), реакция разложения (образование простых молекул из более сложных). В основе химического действия света лежит явление взаимодействия света с веществом.

В обычных условиях возможно демонстрировать только простые химические реакции. Цель этих опытов — ознакомление учащихся с основными закономерностями фотохимических реакций.

1. Реакция разложения. На небольшом расстоянии от конденсора проекционного аппарата ФОС располагают настольный экран. В рамку для диапозитива, прилагаемую к проекционному аппарату, вставляют красный и синий светофильтры. Установив на пути светового пучка красный светофильтр, на экране укрепляют смоченный проявителем лист фотобумаги. При этом цвет фотобумаги не меняется. Затем красный светофильтр заменяют синим. Обращают внимание учащихся на то, что при этом фотобумага темнеет. Учащимся сообщают, что под действием света разлагается бромистое серебро и выделяются атомы свободного серебра. Отсутствие химической реакции при красном свете говорит о том, что свет не любой частоты вызывает фотохимические реакции. Каждой фотохи-

мической реакции соответствует своя красная граница — минимальная частота ν_0, начиная с которой свет вызывает фотохимическую реакцию. Существование красной границы объясняется квантовым поглощением света веществом. Обращают внимание учащихся на то, что степень потемнения фотобумаги зависит от времени нахождения ее на свету. Из этого делают вывод о том, что масса вещества, прореагировавшего в ходе фотохимической реакции, пропорциональна энергии поглощенного веществом света.

2. На пути светового пучка, идущего от диапроектора «Свитязь», помещают кювету из прибора «Электролитическая ванна» с 50%-ным водным раствором иодистого калия, хранящимся в темном сосуде (рис. 201). Часть раствора оставляют для последующего сравнения. Для ускорения реакции в обе части раствора перед опытом наливают по 1 мл 10%-ного раствора соляной кислоты. Включив диапроектор «Свитязь», в течение нескольких минут наблюдают постепенное изменение цвета раствора. Причиной является реакция $4KI+2H_2O+O_2 \rightarrow 4KOH+2I_2$, сопровождающаяся выделением свободного иода, который и окрашивает раствор в темный цвет. Затем учащимся показывают для сравнения ту часть раствора, которая находилась в темноте. Она осталась неокрашенной, т. е. в химическую реакцию не вступала. Делают вывод о том, что условием протекания некоторых химических реакций является действие света. Знакомят учащихся с практическим использованием фотохимических реакций.

§ 15. Атом и атомное ядро

Опыты 207—208. Дискретность энергетических состояний атомов

Из истории физики известно, что прямым доказательством существования стационарных энергетических состояний атомов, т. е. экспериментальным обоснованием первого и второго посту-

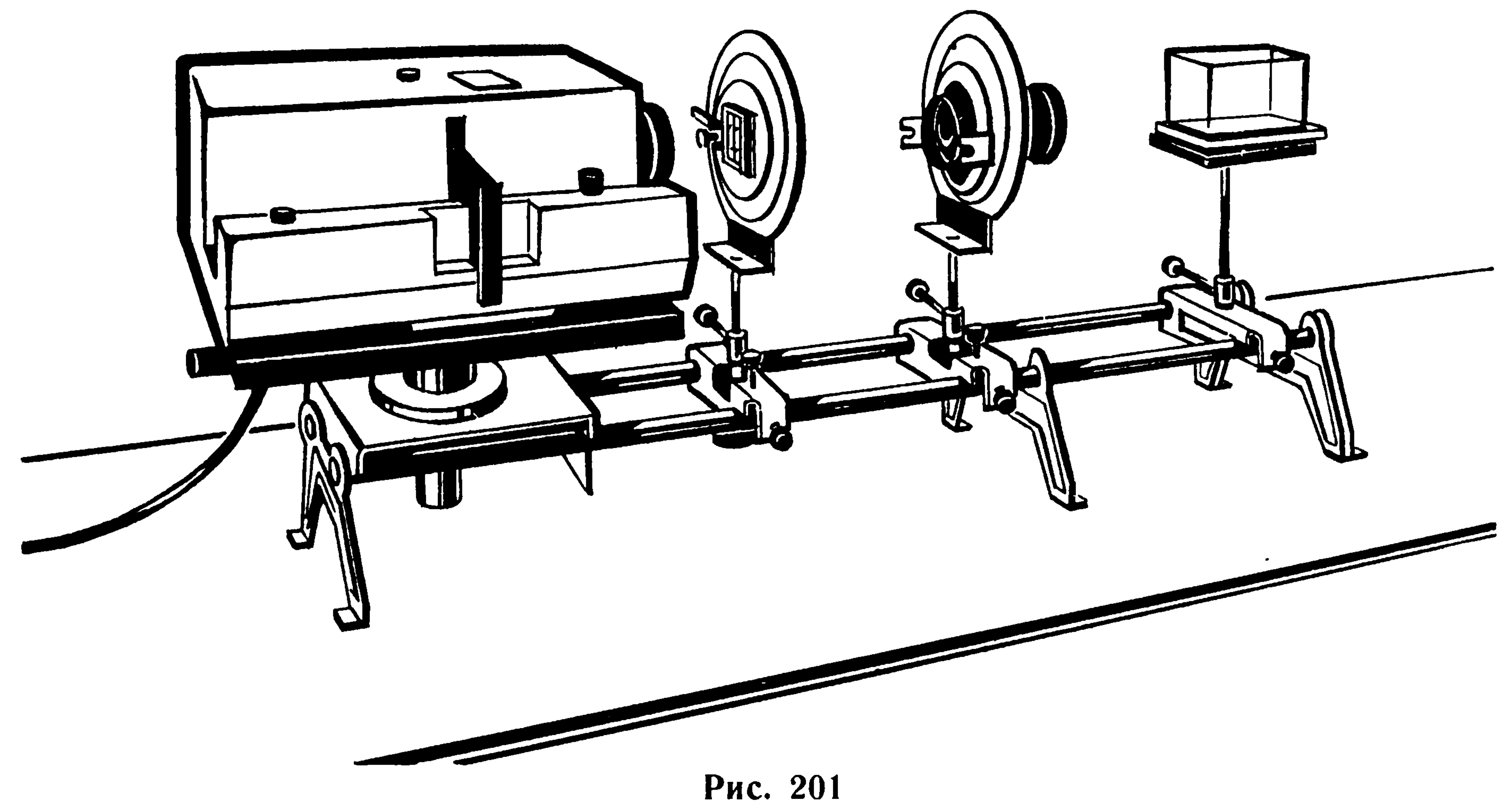


Рис. 201

латов Н. Бора, явилась серия опытов, выполненных в 1913—1917 гг. немецкими физиками Дж. Франком и Г. Герцем. Идея опыта Франка и Герца состояла в том, что, пропуская ускоренные электроны сквозь разреженный газ (пары ртути), они тщательно исследовали зависимость силы анодного тока от ускоряющего напряжения и выявили следующее:

— По мере увеличения кинетической энергии электронов до некоторого значения их соударения с атомами были упругими, без передачи энергии атомам. Об этом свидетельствовало плавное возрастание силы тока в парах ртути при увеличении напряжения.

— При достижении электронами определенного значения кинетической энергии (4,9 эВ) их соударения с атомами приобретали неупругий характер, т. е. электроны почти полностью передавали свою кинетическую энергию атомам. Об этом свидетельствовало то, что при дальнейшем увеличении ускоряющего напряжения сила тока, проходящего через пары ртути, резко уменьшалась — наблюдался провал.

Если говорить об отдельном атоме, то его внутренняя энергия при этом изменялась скачком, дискретно.

— При дальнейшем увеличении ускоряющего напряжения сила тока вновь плавно возрастала, т. е. последующие соударения электронов с атомами, как и прежде, были упругими. Однако при достижении электронами некоторого нового значения кинетической энергии (9,8 эВ) на экспериментальной кривой опять наблюдалось резкое уменьшение силы тока (провал) и т. д. Следовательно, атомы забирают от электронов лишь определенные порции энергии.

1. Непосредственно демонстрацию опытов Франка и Герца провести в школьных условиях довольно сложно. Однако идею опыта о дискретности изменения энергии атомов и осциллограмму с провалами можно весьма просто продемонстрировать на установке (рис. 202), содержащей лампу дневного света. В ее состав, кроме

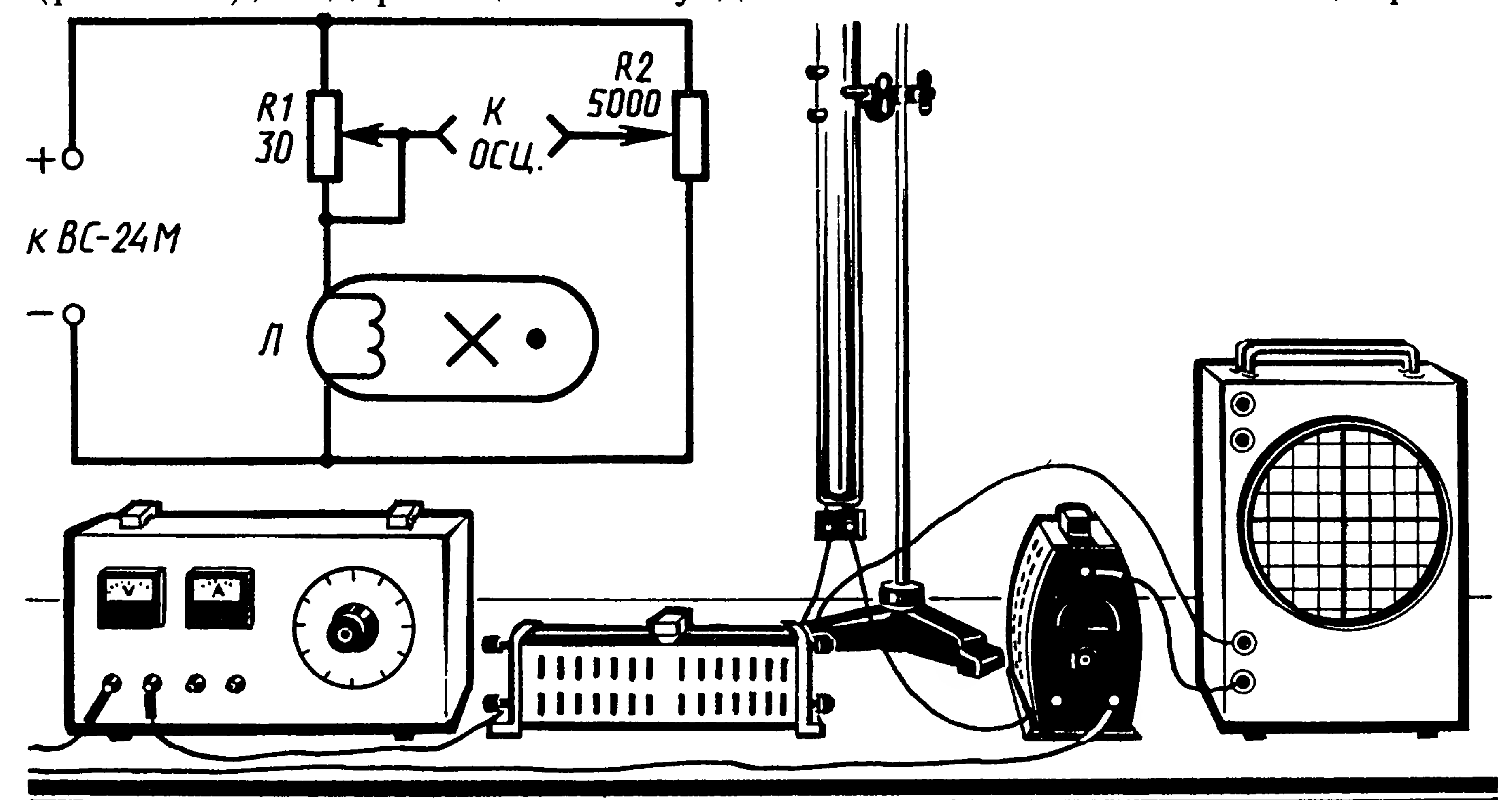


Рис. 202

вертикально установленной в штативе лампы типа ЛД-20, входят выпрямитель ВС-24М, школьный осциллограф и два реостата сопротивлением 30 и 5000 Ом. От клемм «+» и «—» пульсирующее напряжение подается на одну из спиралей лампы, вследствие чего она накаляется. При напряжении порядка 3—4 В на экране осциллографа наблюдается зависимость, характерная для работы двухполупериодного выпрямителя.

По мере увеличения напряжения между электродами, подводящими электрический ток к спирали, внутри лампы возникает газовый разряд. Его нетрудно заметить по изменению характера свечения лампы в области спирали. Одновременно с этим на экране осциллографа будет заметно искажение части синусоиды (появится 1, 2 или даже 3 провала). Подбирая при помощи реостатов наиболее благоприятные для демонстрации условия, манипулируя ручками управления осциллографа, добиваются наиболее четкого представления провалов на вольт-амперной зависимости тока, проходящего через газ и спираль.

Объяснение наблюдаемого в первом приближении может быть следующим.

Электроны эмиссии, испущенные раскаленной спиралью, ускоряются в направлении оси спирали под действием электрического поля между электродами, подводящими ток к спирали. При определенном напряжении между этими электродами энергия электронов становится достаточной для возбуждения атомов газа. Соударения электронов и атомов становятся неупругими. Об этом свидетельствует появление небольшого провала на осциллограмме, а также то, что начинает светиться под действием ультрафиолетового излучения люминофор в области спирали, хотя еще газовый разряд не происходит. Это хорошо наблюдать при проведении демонстрации в полузатемненном кабинете.

По мере увеличения прикладываемого к электродам напряжения продолжает возрастать энергия электронов, однако их соударения с атомами носят упругий характер. Об этом свидетельствует плавное возрастание кривой зависимости на осциллографе. Однако вскоре энергия электронов становится достаточной для ионизации газа. Соударения электронов с атомами становятся неупругими, на экране осциллографа наблюдается 2-й провал. Кроме того, в области спирали заметен газовый разряд. При тщательном подборе лампы можно получить еще несколько провалов.

На основании этой демонстрации делается вывод, что атомы газа возбуждаются и ионизуются электронами лишь в том случае, когда их энергия достигает определенного значения, т. е. изменение энергии каждого отдельного атома происходит скачком, дискретно.

2. Значительно нагляднее опыт Франка и Герца проходит при использовании тиратрона ТГ1-0,1—1,3 или ТГ1-0,02—0,5. Описанная ниже постановка опыта была осуществлена и всесторонне исследована учителем физики одной из школ г. Чемкента Н. И. Триллером. Для постановки этого опыта тиратрон следует установить на панели, схема которой показана на рисунке 203, *а*, а внешний вид — на рисунке 203, *б*.

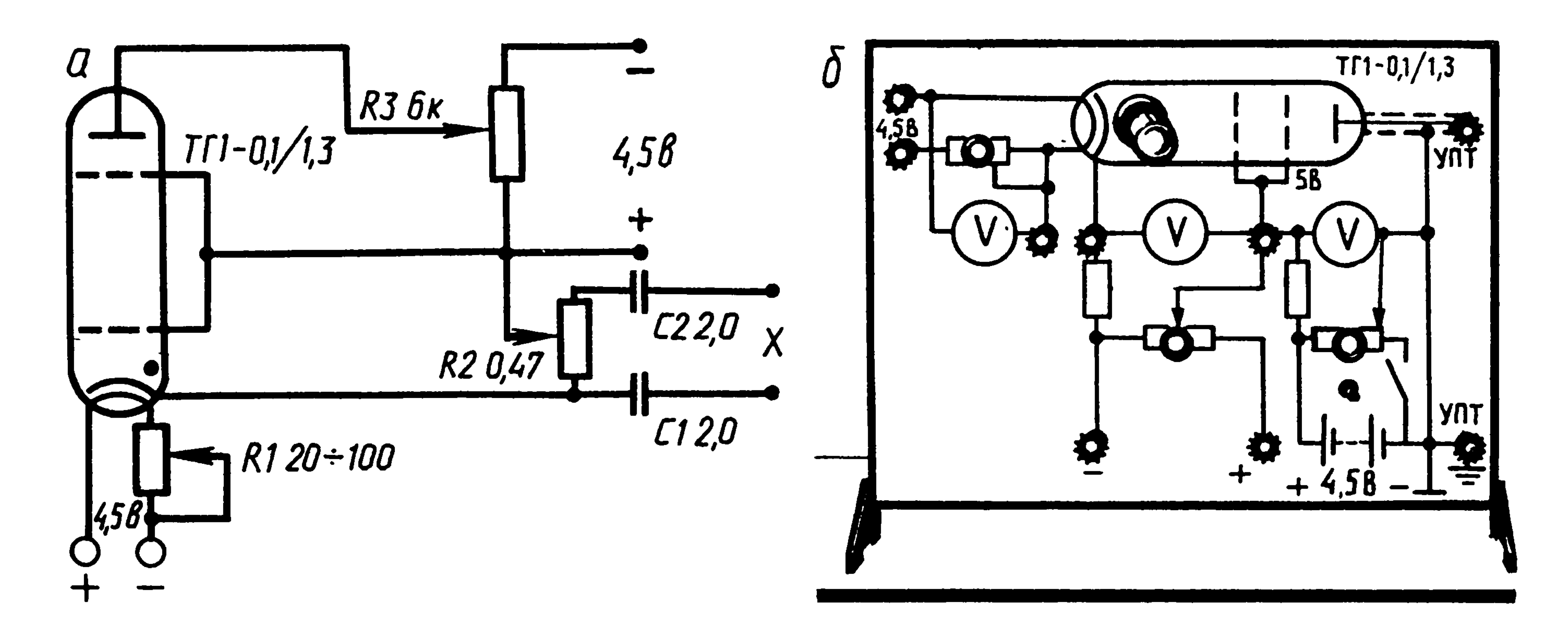


Рис. 203

Потенциометр *R1* служит для регулировки напряжения накала тиратрона, о котором в ходе опыта приходится проявлять особую заботу. Дело в том, что от интенсивности электронного потока в значительной мере зависит успех демонстрации. Питание накала тиратрона обязательно должно производиться от источника постоянного тока. Питание переменным током недопустимо, так как при этом возникают побочные эффекты, полностью искажающие результаты опыта. Для каждого тиратрона напряжение накала, необходимое для успеха опыта, свое. Для тиратрона ТГ1-0,1—1,3 оно может быть от 1,2 до 2,8 В. При напряжениях ниже 1,2 В практически прекращается термоэмиссия катода, а при напряжениях выше 2,8 В возникает тлеющий, а порой и дуговой разряд, при котором неупругие соударения электронов маскируются более интенсивными явлениями и становятся незаметными.

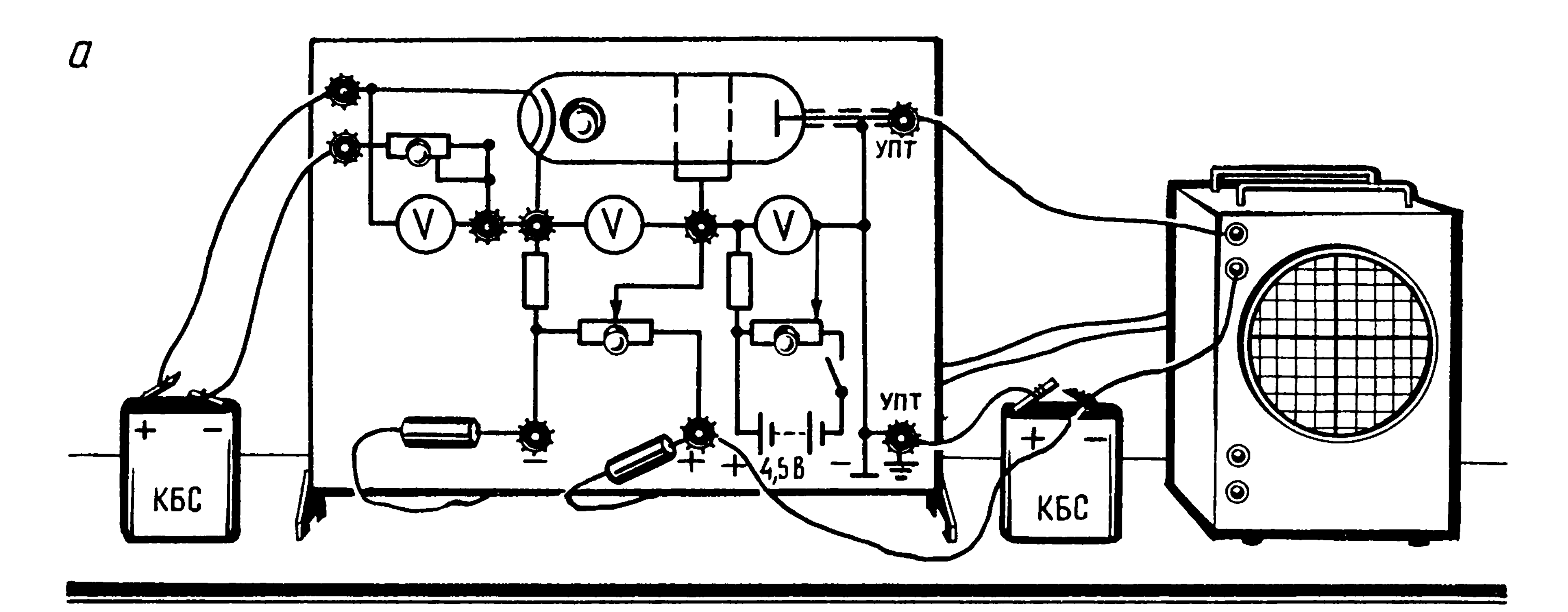
Для тиратрона ТГ1-0,02—0,5 наиболее ярко явления неупругого соударения наблюдаются при напряжениях от 2,7 до 3,8 В.

Переменный резистор *R2* служит для регулировки ускоряющего напряжения на участке катод — цилиндр соударений.

Потенциометр *R3* дает возможность регулировать тормозное напряжение на участке цилиндр соударений — анод (коллектор). Тормозное напряжение составляет от 0,1 до 0,8 В.

Для демонстрации опыта собирается установка, изображенная на рисунке 204, *а,* а на рисунке 204, *б* показана схема этой установки. Достоинством этой схемы является ее сравнительная простота: без всякой регулировки осциллограмма получается неподвижной, так как для возбуждения тиратрона и горизонтальной развертки сигнала, подаваемого с коллектора на вход осциллографа, используется одно и то же напряжение генератора пилообразного напряжения самого осциллографа, что в любом случае без всякой регулировки обеспечивает неподвижность осциллограммы.

Резистор *R4,* подключенный к входу «У» осциллографа, служит для подачи постоянного тормозного напряжения на анод (коллектор) тиратрона.



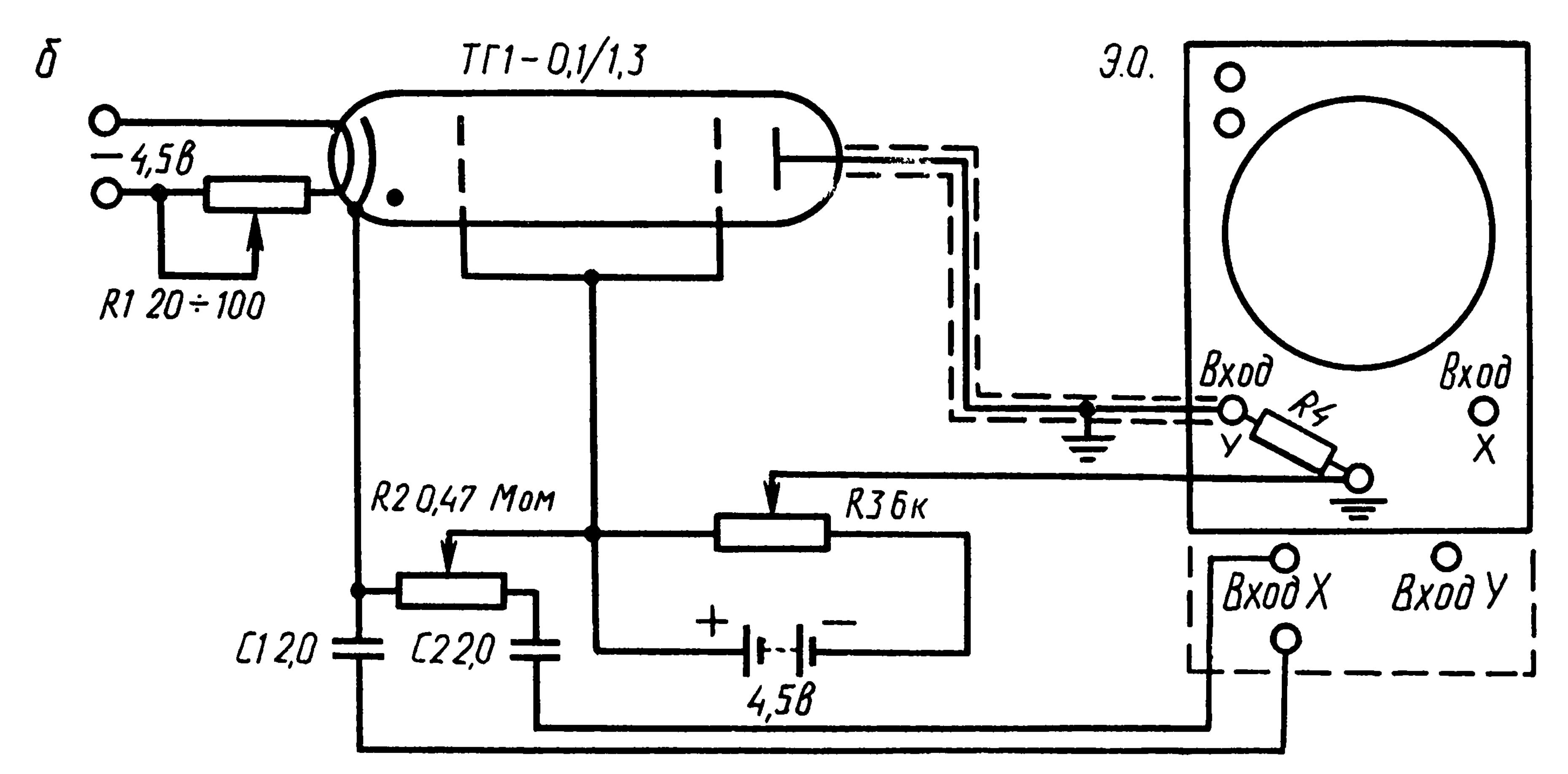


Рис. 204

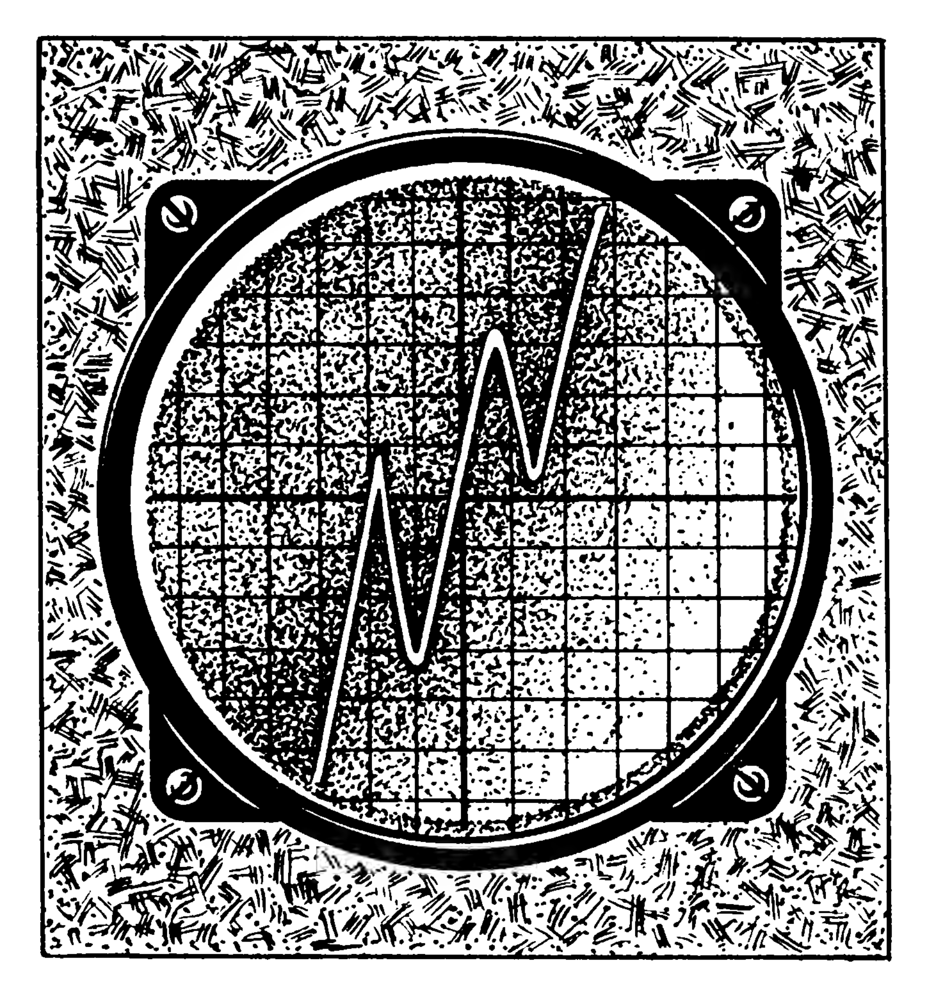


Рис. 205

Конденсаторы *C1* и *C2* служат для задержки постоянной составляющей пилообразного напряжения на резистор *R2*. Анод (коллектор) соединен с входом «У» осциллографа экранированным проводом, экран которого заземлен.

На рисунке 205 приведена осциллограмма, полученная в ходе опыта с тиратроном ТГ1-0,1—1,3. Данные опыта: напряжение накала — 1,4 В, тормозное напряжение — 0,1 В, частота развертки 30—150 Гц. Как видно из рисунка, осциллограмма имеет два очень четких минимума. Третий минимум не наблюдается.

Если в школе нет электронного осциллографа, опыт может быть поставлен со стрелочными демонстрационными измерительными приборами. Однако из-за малости коллекторного тока необходимо использовать для его усиления усилитель постоянного тока. Внешний вид установки показан на рисунке 206.

Опыт 209. Электрометрический метод регистрации ионизирующих излучений

Этот опыт иллюстрирует один из первоначальных экспериментальных методов ядерной физики, который разрабатывался и применялся в исследованиях А. Беккереля, Э. Резерфорда, Марии и Пьера Кюри и др. Благодаря его применению были получены многие важные для науки данные: в частности, А. Беккерель обнаружил, что испускаемое ураном излучение разряжает электрически заряженные тела; Э. Резерфорд определил электрический заряд альфа-частиц; Мария и Пьер Кюри выявили радиоактивность тория, открыли два новых химических элемента — полоний и радий.

Демонстрационная установка состоит из простейшей ионизационной камеры конденсаторного типа, соединенной с электрометром. Ионизационную камеру образуют два металлических диска, которые входят в комплект электрометра. Один из них надет непосредственно на стержень электрометра, другой установлен при помощи универсального штатива в 30—40 мм над первым. Верх-

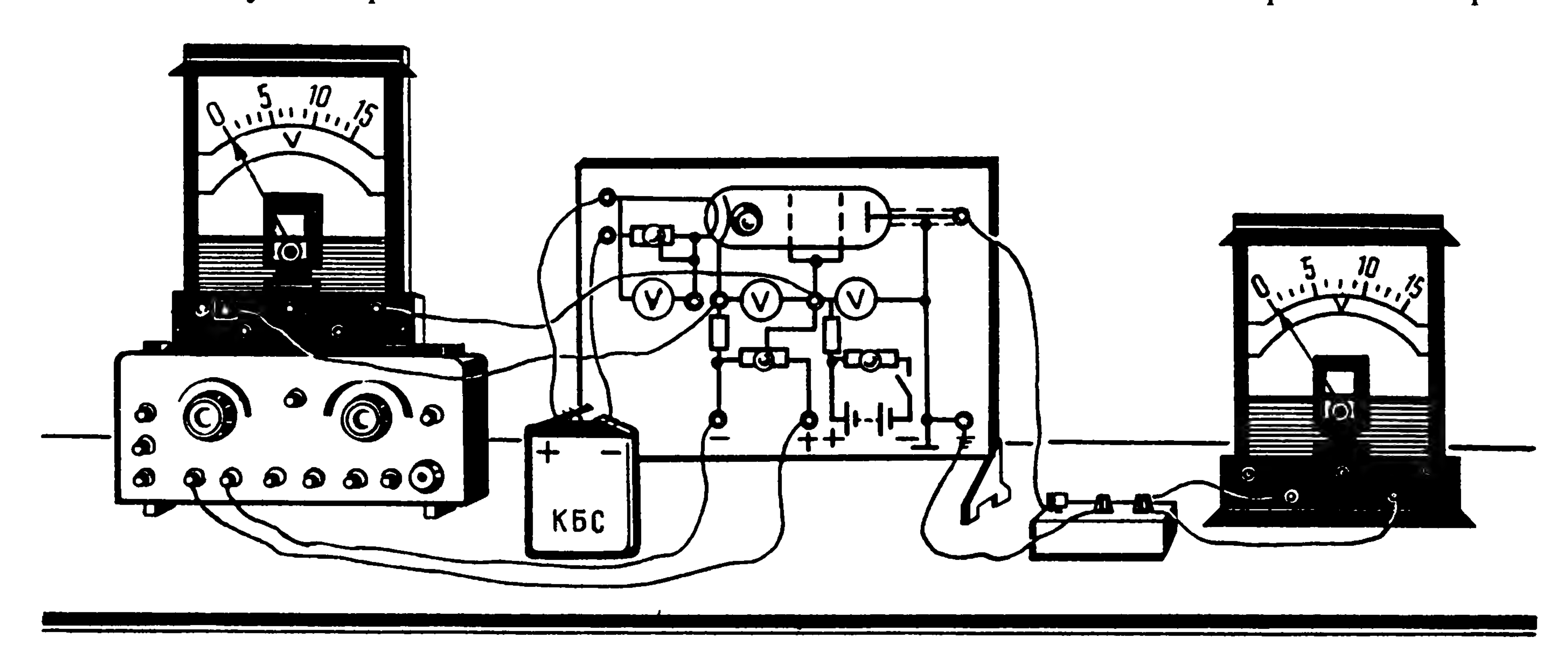


Рис. 206

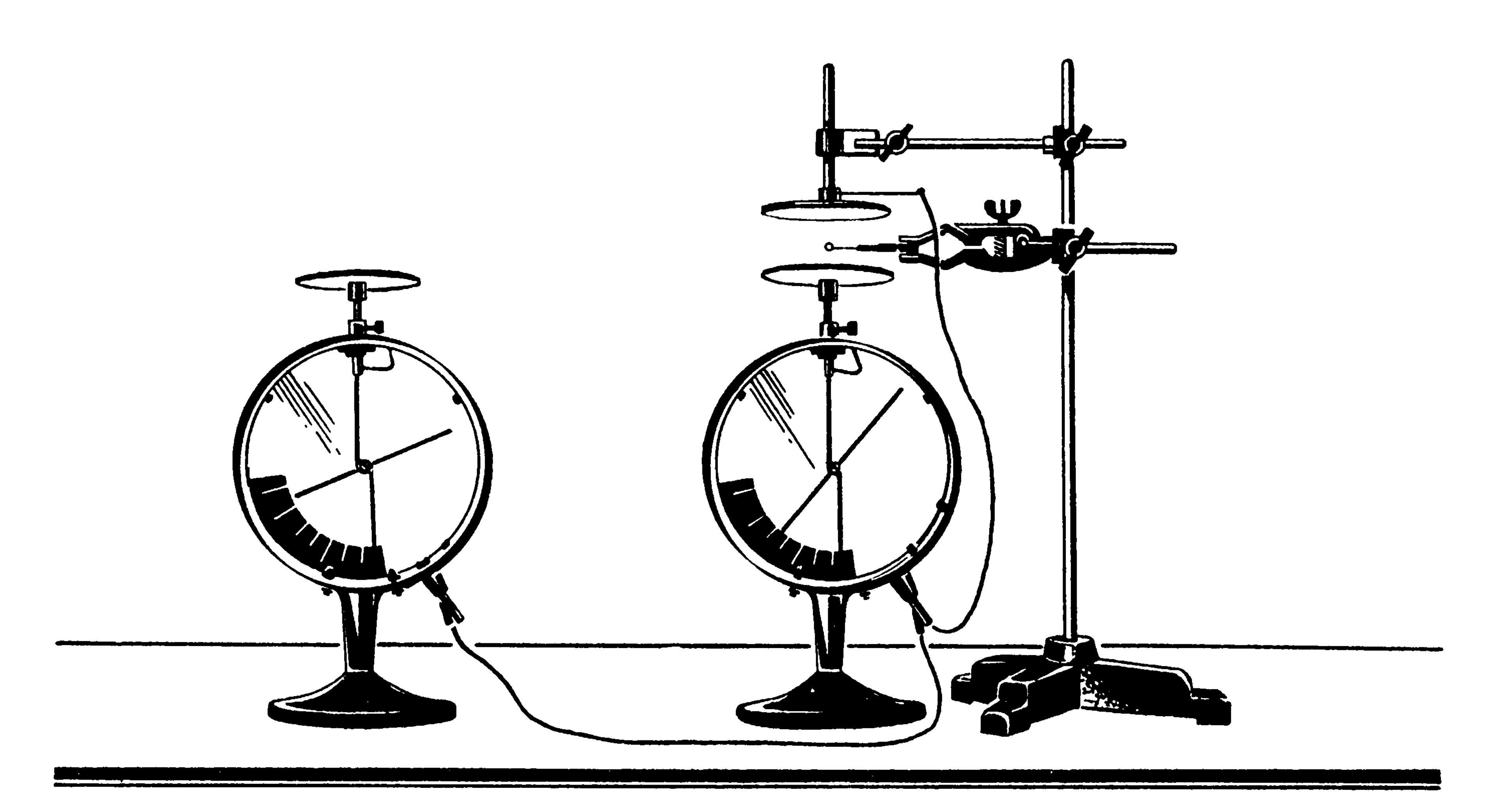


Рис. 207

ний диск соединяют проводником с корпусом электрометра и заземляют. К той же клемме посредством проводника подсоединяют корпус еще одного контрольного электрометра, который служит для сравнения скорости разрядки. Оба электрометра заряжают наэлектризованной эбонитовой палочкой так, чтобы стрелки их отклонялись на одинаковые углы, и на стекла наклеивают метку. После этого в центре ионизационной камеры размещают излучатель альфа-частиц АК-30 от камеры Вильсона (рис. 207). Через 3—5 мин замечают, что стрелка электрометра, соединенного с ионизационной камерой, опустилась примерно на два деления. За то же время стрелка контрольного электрометра отклонилась незначительно.

Результаты опыта объясняют так. Альфа-частицы, испущенные источником АК-30, ионизируют воздух внутри ионизационной камеры. Образующиеся ионы, двигаясь под действием электрического поля, создают электрический ток, за счет которого ионизационная камера (плоский конденсатор) постепенно разряжается. Но не только альфа-частицы обладают ионизирующим действием. Если вместо источника АК-30 внести излучатель бета- и гамма-излучений, приготовленный на основе калийных солей (изотоп ^{40}K), то можно продемонстрировать аналогичное действие, однако качество демонстрации ухудшается. Источник бета- и гамма-излучений представляет собой цилиндрический бумажный футляр диаметром 100 мм и толщиной 5—6 мм, заполненный калийной солью K_2CO_3 (карбонат калия).

Если источник излучений изолировать листом металлической фольги или жести, то возникает возможность демонстрировать защиту от ионизирующих излучений. Отметим, что для успешного проведения этих демонстраций необходимо тщательно готовить установку: электрометры и металлические диски должны быть просушены, проводники — иметь надежную изоляцию.

Примечание. Источник альфа-частиц АК-30 учитель непосредственно перед демонстрацией с необходимой осторожностью извлекает из камеры Вильсона и сразу же после проведения демонстрации помещает на место, т. е. в камеру Вильсона. Источник представляет собой держатель-подложку из латунной проволоки длиной 32 мм и диаметром 1 мм. На ее конце, изогнутом в форме кольца диаметром 5 мм, помещен и зафиксирован препарат с изотопами плутония. Поток альфа-частиц, распространяющийся внутри угла 4π ср, составляет 700 ± 3 частиц/с. Частицы обладают кинетической энергией 5,15 МэВ, вследствие чего длина их пробега в воздухе при нормальном давлении не превышает 40 мм. Поэтому при демонстрации необходимо так размещать источник, чтобы его активная часть находилась значительно дальше от поверхности тела.

Демонстрационный искровой детектор альфа-частиц позволяет просто и с хорошей наглядностью демонстрировать процессы, происходящие в воздушном пространстве между анодом и катодом. Понимание их доступно учащимся на основе ранее изученного материала (искровой разряд); поэтому целесообразно, чтобы демонстрации с искровым детектором предшествовали опытам с использованием трубок Гейгера — Мюллера. Это позволяет значительно быстрее сформировать в сознании учащихся представления о процессах, происходящих в газоразрядной счетной трубке при регистрации ионизирующих частиц. Кроме того, демонстрации с искровым детектором отражают в школьной практике один из наиболее новых экспериментальных методов исследований в ядерной физике.

Опыт 210. Устройство и принцип действия искрового детектора альфа-частиц

Вначале объясняют учащимся устройство искрового детектора. Обращают их внимание на воздушное пространство между катодом и анодом и отмечают, что анод (система тонких проволок) имеет большую кривизну, что обусловливает значительную неоднородность электрического поля в этом пространстве. Далее знакомят с электрической схемой питания, где в роли высоковольтного источника используется преобразователь «Разряд-1».

Собирают установку по схеме рисунка 208. Включают выпрямитель ИЭПП-2 и устанавливают на выходе напряжение 8—10 В. Добиваются работы преобразователя «Разряд-1». Высокое напряжение с помощью проводов с усиленной изоляцией подают на электроды искрового детектора (его описание дано в § 20). В воздушном промежутке между анодом и катодом, толщину слоя которого выбирают 4—8 мм, обычно искр не наблюдается. Если приблизить на расстояние 20—30 мм к аноду источник альфа-частиц, то между электродами начинают проскакивать искры. Каждый искровой разряд сопровождается значительными акустическими и оптическими эффектами, что позволяет наблюдать и регистрировать их визуально или на слух. Вращая рукоятку винтового устройства,

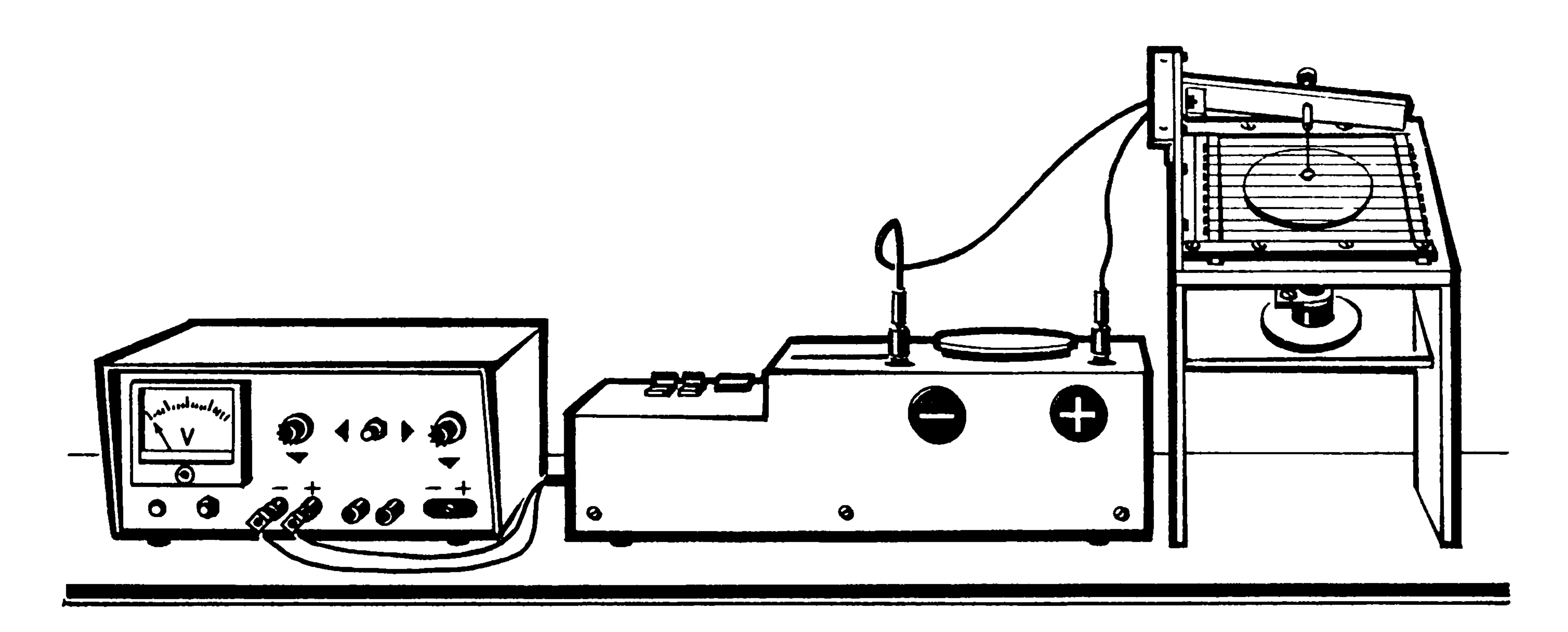


Рис. 208

т. е. изменяя расстояние между анодом и катодом, добиваются, чтобы эти эффекты были наиболее четкими и выразительными. Следует обратить внимание учащихся на очевидность того факта, что испускание альфа-частиц радиоактивным препаратом носит статистический характер как во времени, так и в пространстве. Искровые разряды возникают в различных местах плоскости катода, и невозможно предугадать ни место появления очередного разряда, ни интервал времени между разрядами.

Опыты 211—213. Свойства альфа-частиц

Для проведения опытов используют описанную выше установку, а также источник бета- и гамма-излучений, тонкий лист бумаги, полиэтиленовую пленку, алюминиевую фольгу.

1. Ионизирующая способность альфа-частиц. На расстоянии 20—30 мм от анода искрового детектора размещают источник бета- и гамма-излучений (бумажный футляр, заполненный калийной солью K_2CO_3). При этом искровой детектор не реагирует на ионизирующие излучения. Но если к нему на такое же расстояние поднести источник альфа-частиц АК-30, то между анодом и катодом наблюдаются искровые разряды. Этот опыт свидетельствует о значительно большей ионизирующей способности альфа-частиц по сравнению с бета-частицами и гамма-квантами. Полезно сообщить учащимся, что при нормальных условиях альфа-частицы создают около $3 \cdot 10^4$ пар ионов на 1 см пути, в то время как бета-частицы — всего несколько десятков пар (имеются в виду частицы с энергией в несколько мегаэлектронвольт).

2. Длина пробега альфа-частиц. Известно, что альфа-частицы, испущенные определенным радионуклидом, имеют почти одинаковую длину пробега в воздухе при нормальном атмосферном давлении из-за одинаковой кинетической энергии. Опыт демонстрируют следующим образом. Источник АК-30 размещают на расстоянии менее 10 мм от анода искрового детектора. При этом наблюдается

уверенная регистрация альфа-частиц. Постепенно увеличивают расстояние между источником и анодом и отмечают, что средняя частота следования искровых разрядов почти не изменяется, но при некоторой толщине воздушного слоя (30—33 мм) регистрация альфа-частиц внезапно прекращается. Этот факт свидетельствует о том, что все альфа-частицы, испущенные радионуклидом плутоний-239, пролетают в воздухе примерно одинаковые расстояния. Учащимся сообщают, что длина свободного пробега альфа-частиц зависит от энергии частиц, а для естественных радионуклидов в воздухе не превышает 120 мм. У большинства же пробег составляет 30—90 мм. Для альфа-частиц с энергией 5,15 МэВ, которые испускает радионуклид плутоний-239, длина пробега в воздухе равна 35—36 мм. Если в роли источника использовать соли природного урана (уран-238), то длина свободного пробега альфа-частиц составит примерно 30 мм. Если в роли источника использовать соли радия с нуклидом радий-226 (стрелку со светящейся светомассой), то можно продемонстрировать, что длина свободного пробега альфа-частиц равна примерно 65 мм.

3. Поглощение альфа-частиц веществом. В более плотной, чем воздух, среде длина свободного пробега альфа-частиц значительно меньше. Они полностью поглощаются тонкими листами бумаги, металла, пластмассы и т. п. Это легко продемонстрировать. Если во время работы искрового детектора между анодом и источником АК-30 поместить лист бумаги, полиэтиленовую пленку или металлическую фольгу толщиной около 0,1 мм, то регистрация альфа-частиц полностью прекращается. Это свидетельствует о том, что даже тонкие слои вещества полностью поглощают альфа-частицы и могут служить экранами от этого вида излучений. Однако следует указать, что если толщина слоя вещества будет очень малой (менее 0,01 мм), то альфа-частицы проникают через такие тонкие пластины, например слюды, алюминия и др. Это широко используется в конструкциях детекторов для регистрации заряженных частиц и других ионизирующих излучений (торцовые счетчики Гейгера — Мюллера, имеющие тонкое слюдяное окошко, сцинтилляционные детекторы и полупроводниковые детекторы, покрытые металлической фольгой).

Опыты 214—215. Счетчик Гейгера — Мюллера

Описанные ниже демонстрации отражают в школьной практике один из наиболее распространенных экспериментальных методов подсчета отдельных частиц и квантов электромагнитного излучения. Основополагающую роль в его внедрении сыграли исследования Э. Резерфорда и Г. Гейгера. Счетная газоразрядная трубка конструкции Г. Гейгера и В. Мюллера получила достаточное применение в учебном эксперименте по ядерной физике. Описание ее устройства и принципа действия имеется в школьном учебнике, методических пособиях.

1. Устройство и принцип действия ИЧД-2. Собирают установку по рисунку 209. Индикатор частиц ИЧД-2, основным элементом которого является газоразрядная трубка СБМ-20, посредством кабеля, имеющего специальный октальный разъем, подключают к выпрямителю ВУП-2М. К выходу индикатора через усилитель низкой частоты подключают громкоговоритель (из набора радиотехнического НРТ-2). В непосредственной близости от газоразрядной трубки размещают источник бета- и гамма-излучений. После включения электропитания (УНЧ питают от выпрямителя типа ИЭПП) громкоговоритель время от времени производит резкие щелчки, свидетельствующие о регистрации установкой ионизирующих частиц и гамма-квантов.

Необходимо в первой же демонстрации, опираясь на знания учащихся о разряде в газах, процессе излучения света и строении трубки Гейгера — Мюллера, объяснить процессы, приводящие к регистрации ионизирующих излучений газоразрядной счетной трубкой.

Применяемая счетная трубка представляет собой тонкостенный металлический баллон (может быть стеклянный баллон, в котором имеется изготовленный в форме цилиндра металлический электрод — катод), по оси которого натянута тонкая металлическая нить. Металлический корпус является катодом, а тонкая нить — анодом. Баллон заполнен инертным газом аргоном с примесью паров этилового спирта, т. е. рабочим веществом, к которому приложено электрическое напряжение. Наличие резкой асимметрии электродов приводит к тому, что электрическое поле велико в малой области вокруг анодной нити (в цилиндрическом объеме радиусом примерно 0,1 мм) и мало в остальном внутреннем пространстве газоразрядной трубки. Если заряженная частица пролетает через

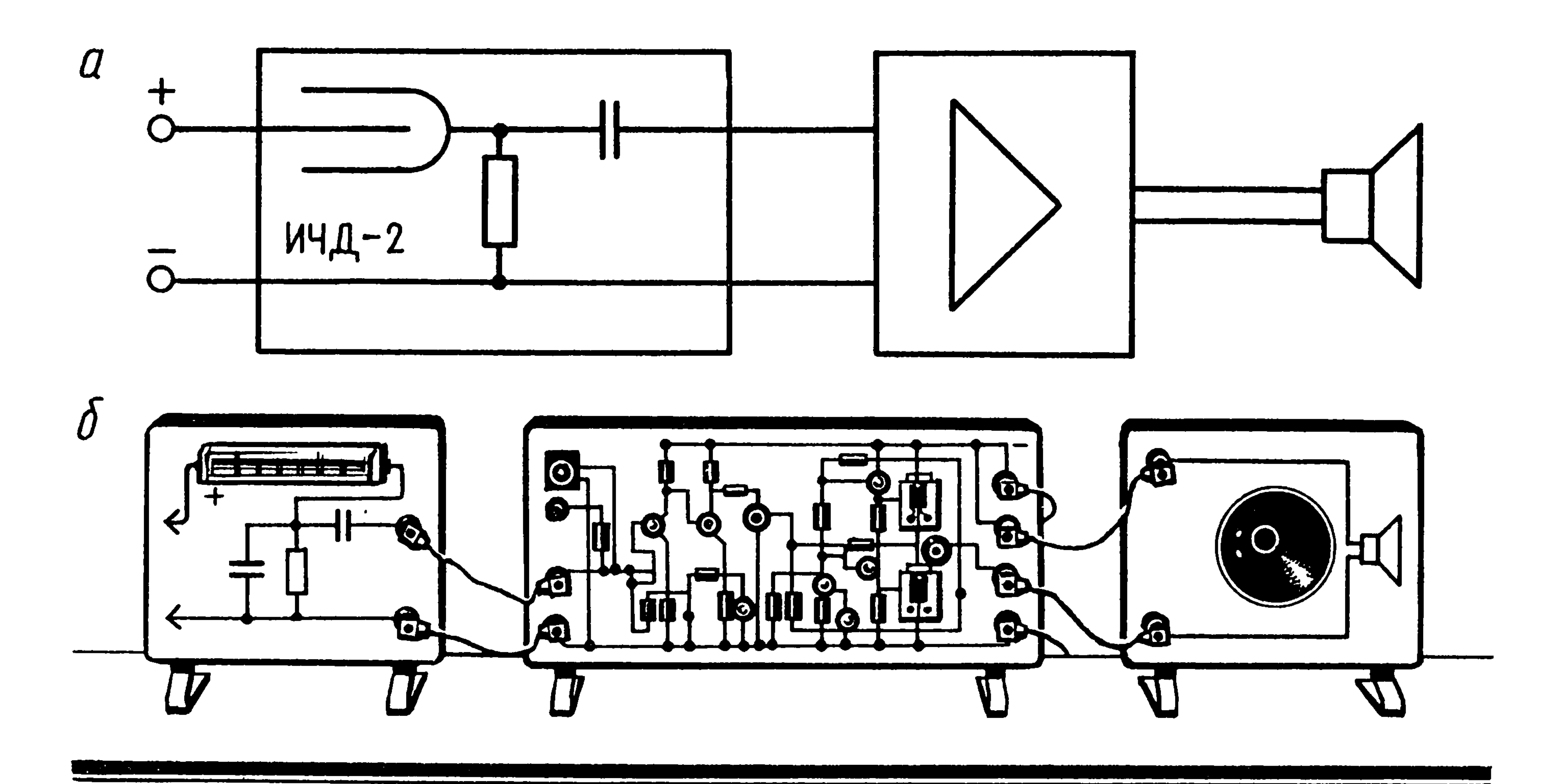


Рис. 209

воздушное пространство счетчика, то вдоль своей траектории она производит первичную ионизацию газа. Образованные при этом электроны и положительные ионы разгоняются электрическим полем и начинают двигаться к соответствующим электродам. Электроны попадают в область все более сильного электрического поля и у самой нити резко ускоряются. В результате возникает вторичная ударная ионизация. Поле в области анода столь велико, что выбитые электроны успевают разогнаться и в свою очередь произвести новую вторичную ионизацию и т. д. Этот процесс носит лавинный характер. Ток в газе резко возрастает и, проходя через высокоомный резистор, включенный в цепь электропитания трубки, создает на нем импульс напряжения. Этот импульс через разделительный конденсатор поступает на вход усилителя низкой частоты и после усиления воспроизводится громкоговорителем в виде резкого щелчка.

Рассмотрим, каково назначение паров спирта — составной части рабочего вещества газоразрядной трубки. Во-первых, электроны, производящие вторичную ионизацию газа, кроме этого, еще и возбуждают нейтральные атомы газа. Возвращаясь в исходное состояние, атомы аргона испускают фотоны, которые могли бы в результате фотоэффекта выбить из катода счетной трубки фотоэлектроны. Однако пары спирта сильно поглощают эти фотоны, и повторные лавины за счет фотоэлектронов не происходят. Во-вторых, положительные ионы аргона, долетев до катода газоразрядной трубки, могли бы в процессе нейтрализации выбивать из него электроны. Но, двигаясь к катоду, эти положительные ионы соударяются с молекулами спирта. При этом энергетически выгодным становится переход электрона от молекулы спирта к положительному иону, т. е. ионизация молекулы спирта и нейтрализация аргона. После этого до катода долетают в основном тяжелые медленные ионы спирта, которые при нейтрализации не выбивают электронов. Из всего этого следует, что в результате подбора состава и давления газовой смеси, напряжения, приложенного к электродам, возможно прекращение самостоятельного разряда в газе, вызванного ионизирующим излучением. Такие газоразрядные счетные трубки, наполненные многоатомными газами, называются самогасящими. Разрешающее время их составляет 10^{-3} — 10^{-4} с.

Применяемый в этом опыте источник бета- и гамма-излучений несложно изготовить в школьных условиях. Для этого достаточно удалить содержимое электролитического конденсатора 20,0 мкФ и 450 В, а образовавшийся алюминиевый сосуд заполнить калийной солью K_2CO_3. Тщательно заклеенный тонкой бумагой торец будет окном излучения.

2. Демонстрация счетной установки. Непосредственно к выходу ИЧД-2 подключают счетчик электрических импульсов, например «Кварц», выдающий информацию в цифровой форме (рис. 210). Собранная установка позволяет подсчитать число регистрируемых бета-частиц и гамма-квантов за некоторый промежуток времени.

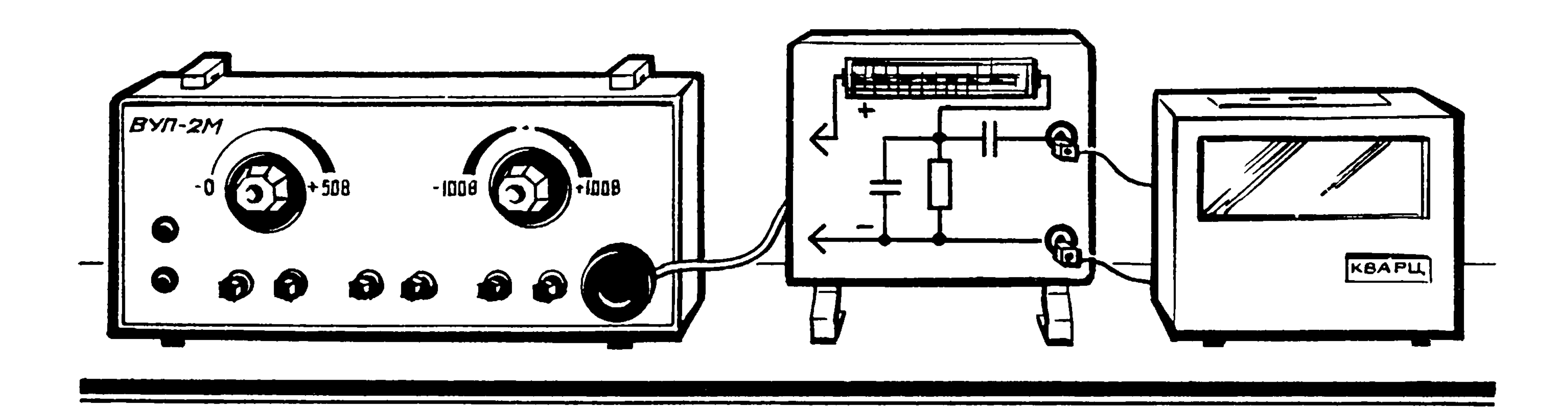


Рис. 210

Отметим, что наличие в ИЧД-2 вокруг трубки СБМ-20 плексигласового экрана, роль которого — изолировать руку демонстратора от металлического корпуса трубки, не способствует проведению демонстраций с наиболее доступными в настоящее время источниками бета-частиц и гамма-квантов, изготовленными из калийных солей.

Опыт 216. Обнаружение естественного радиационного фона

Включив электропитание установки, показанной на рисунке 209 или 210, нетрудно заметить, что она реагирует на ионизирующие излучения, причем за 1 мин регистрируется примерно 17—27 ионизирующих частиц и гамма-квантов. Все чувствительные приборы для измерения ионизирующих излучений даже при отсутствии вблизи радиоактивных препаратов регистрируют наличие излучений, именуемых естественным радиационным фоном. Фон обусловлен действием космических лучей, которое для данной местности практически постоянно, действием излучений от радиоактивных веществ в районе излучений, поскольку соли урана, радия, тория и продуктов их распада широко распространены в незначительных концентрациях, а также излучений естественнорадиоактивного нуклида калий-40 и действием незначительных радиоактивных примесей в материалах, из которых изготовлены регистрирующие приборы. Влияние космических лучей можно частично ослабить, окружив детектор свинцовым экраном, но полностью устранить фон невозможно. Он определяет предел чувствительности регистрирующих устройств. Истинная активность радионуклида в препарате будет получена при вычитании активности фона из активности, полученной при измерении с конкретным излучателем.

Опыт 217. Принцип действия радиометрической установки

Для измерений в ядерной физике, кроме установок с представлением информации в цифровой форме, широко применяются раз-

личные измерительные устройства с выдачей полученной информации в аналоговой форме, т. е. посредством стрелочного измерительного прибора. Использование их в учебном эксперименте создает определенные методические удобства при постановке демонстраций по ядерной физике.

Собирают установку по рисунку 211. На вход усилителя низкой частоты подключают демонстрационный индикатор частиц ИЧД-2, а к низкоомному выходу усилителя подключают четырехполюсник, смонтированный на панели и содержащий полупроводниковый диод, электролитический конденсатор на 50 мкФ и резистор сопротивлением 10 кОм. К выходу четырехполюсника подсоединяют гальванометр от демонстрационного амперметра. Включают электропитание установки. К газоразрядной трубке детектора на расстояние 20—30 мм подносят закрепленный в держателе штатива источник бета-частиц и гамма-квантов на основе радионуклида калий-40. Обращают внимание учащихся на то, что установка регистрирует ионизирующие излучения. При этом стрелка гальванометра отклонилась на несколько делений. Медленно удаляют источник излучений и замечают, что показания регистрирующего прибора установки уменьшаются до первоначального, фонового,

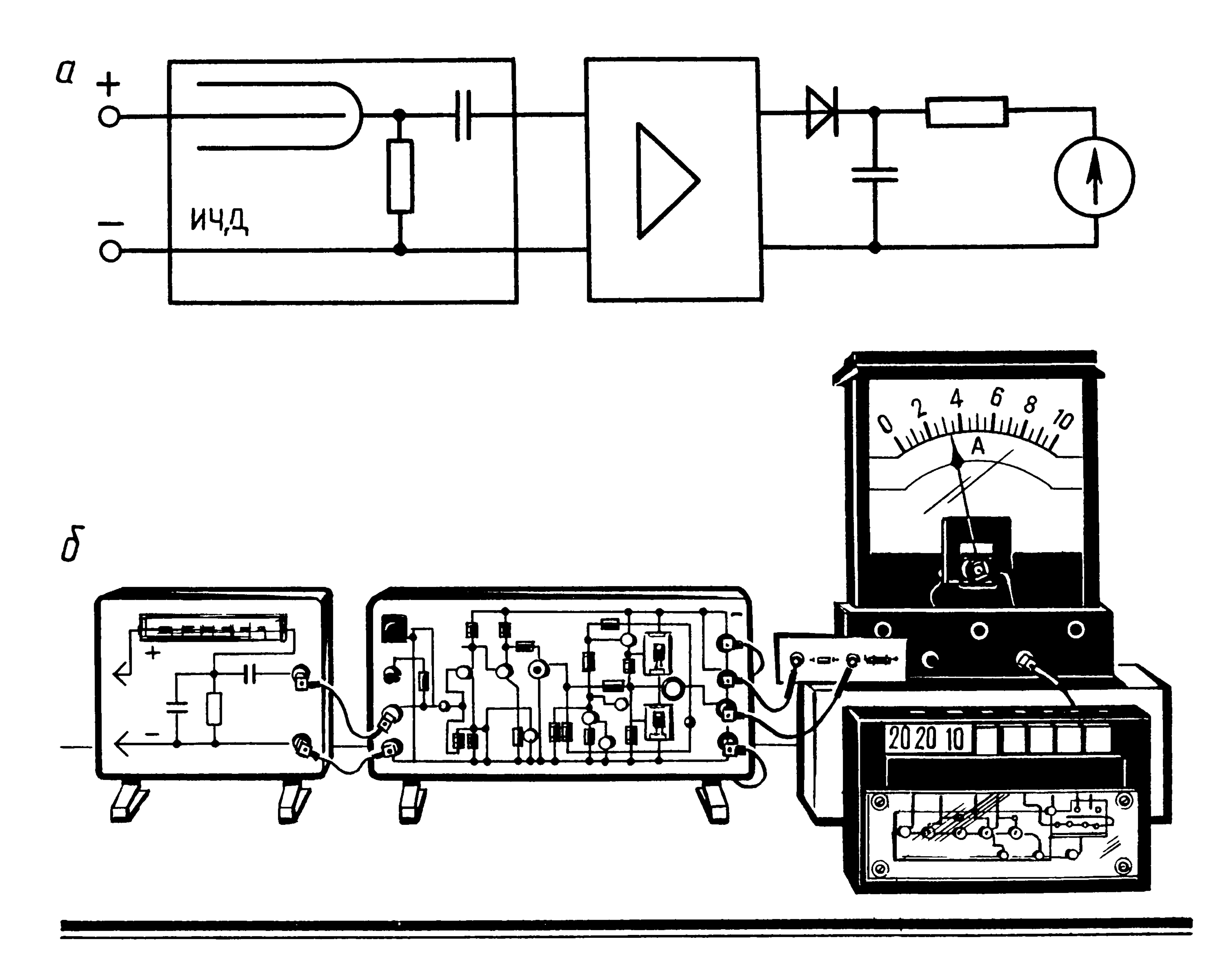


Рис. 211

значения. Далее объясняют устройство и принцип действия установки. Она состоит из детектора ионизирующих излучений, в роли которого используется ИЧД-2. Детектор, реагируя на бета-частицы и гамма-кванты, пролетающие через воздушное пространство между анодом и катодом, создает на выходе импульсы напряжения. Эти положительной полярности импульсы подаются на вход усилителя низкой частоты — последующего функционального узла установки — и после усиления поступают через полупроводниковый диод на следующий функциональный узел — интегрирующий контур, образованный конденсатором и резистором разрядки. Каждый импульс сообщает накопительному конденсатору некоторую порцию электрического заряда и тем самым увеличивает напряжение на нем. Чем больше частота следования импульсов, тем выше будет напряжение на конденсаторе. Но накопительный конденсатор имеет возможность непрерывно разряжаться через резистор разрядки и включенный последовательно с ним гальванометр. Ток разрядки при этом будет прямо пропорционален числу импульсов, поступивших от детектора в единицу времени, т. е. скорости счета. Следовательно, описанная радиометрическая установка, по существу, является интенсиметром (измерителем скорости счета или измерителем средней частоты). Используя ее, можно осуществить демонстрацию интересных опытов[1], однако громоздкость установки усложняет их постановку. В дальнейшем описаны опыты с применением самодельного интенсиметра.

Опыт 218. Работа детектора с газоразрядной трубкой при различных напряжениях

Собирают установку по рисунку 212. На детектор с газоразрядной трубкой СТС-6 подают напряжение, регулируемое в пределах от 250 до 450 В. Для этого последовательно соединяют клеммы выхода постоянного напряжения 350 В и регулируемого напряжения 0±100 В выпрямителя ВУП-2. Демонстрационный вольтметр со шкалой на 15 делений и дополнительным резистором сопротивлением 100 кОм подключают к клеммам электропитания детектора. Включив выпрямитель и проверив работу установки (выявляют фон), уменьшают напряжение до 250 В и отмечают, что показания интенсиметра (см. рис. 212), подключенного к детектору, отсутствуют, так как трубка Гейгера — Мюллера СТС-6 начинает реагировать на ионизирующие излучения при напряжении порядка 300 В. Источник ионизирующих излучений, укрепленный в штативе, размещают на расстоянии 10—20 мм от счетной трубки детектора. Плавно увеличивают напряжение, подводимое к электро-

---

[1] Демонстрационный эксперимент по физике в средней школе / Под ред. А. А. Покровского.— М.: Просвещение, 1979.— Ч. 2. — С. 270—273.

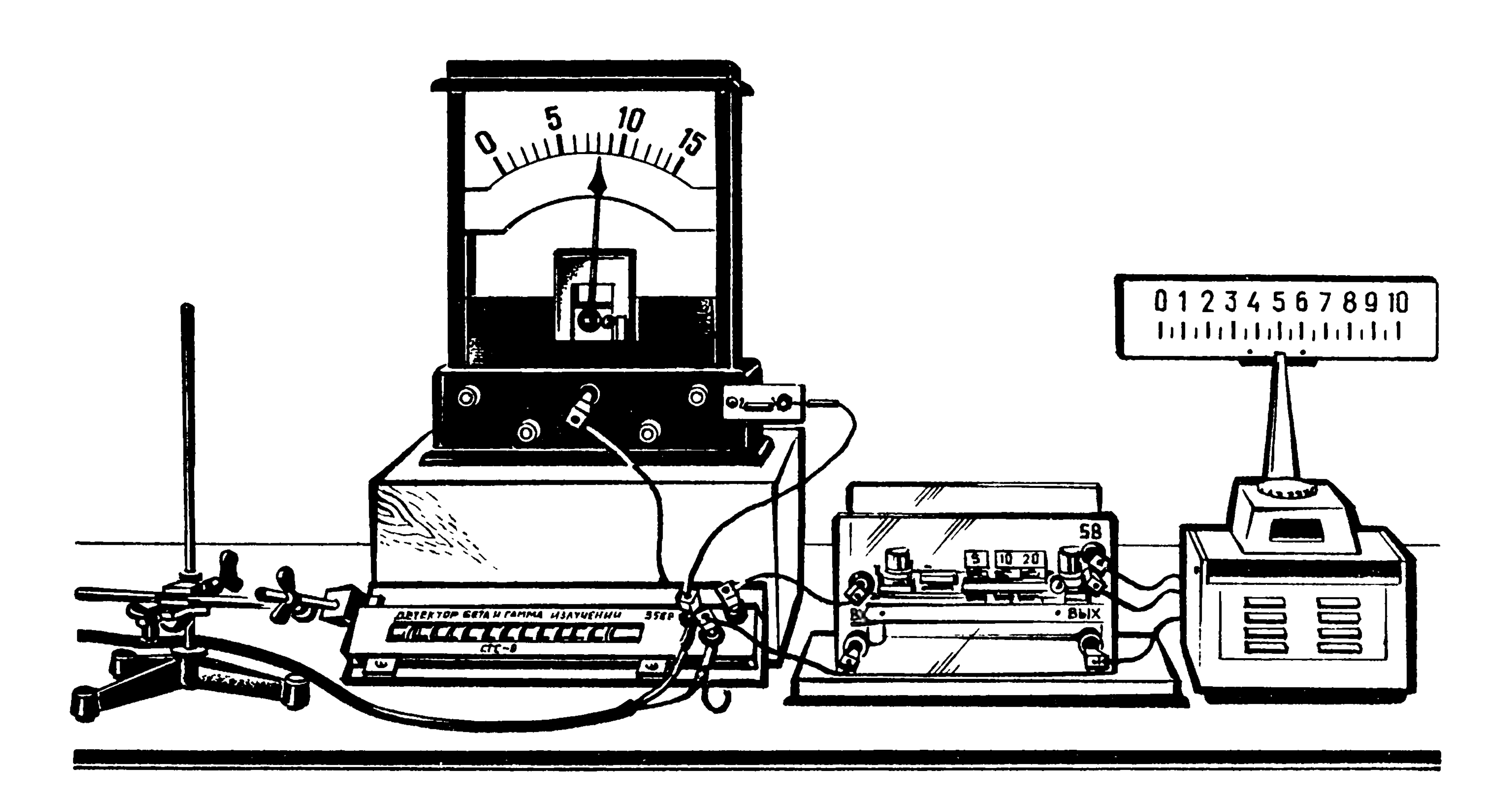


Рис. 212

дам трубки, и замечают, при каком значении начинается регистрация бета-частиц и гамма-квантов. Его именуют напряжением зажигания газоразрядной трубки. Далее через каждые 30 В (одно деление шкалы вольтметра) отмечают показания интенсиметра. При анализе результатов опыта обращают внимание учащихся на наличие плато и что в пределах его скорость счета с увеличением напряжения возрастает незначительно, а также выбирают для данной трубки рабочее напряжение, соответствующее середине плато.

Опыт 219. Зависимость интенсивности излучений точечного источника от расстояния

Интенсивность излучений, которая прямо пропорциональна скорости счета, для точечного источника ионизирующих излучений подчиняется квадратичному закону расстояний, если на пути излучений отсутствует поглощение.

К горизонтально укрепленному в штативе детектору (рис. 213) вертикально приставлена измерительная линейка так, что начало ее шкалы совпадает с осью трубки СТС-6. Установка регистрирует фон. Источник ионизирующих излучений размещают на расстоянии 300 мм над трубкой СТС-6. При этом показания интенсиметра лишь немного превышают фон. Далее медленно опускают излучатель и через каждые 50 мм отмечают показания интенсиметра. По данным опыта делают вывод, что при уменьшении расстояния в 2 раза скорость счета, а соответственно и интенсивность излучений увеличиваются примерно в 4 раза, т. е. интенсивность излучений обратно пропорциональна квадрату расстояния между источни-

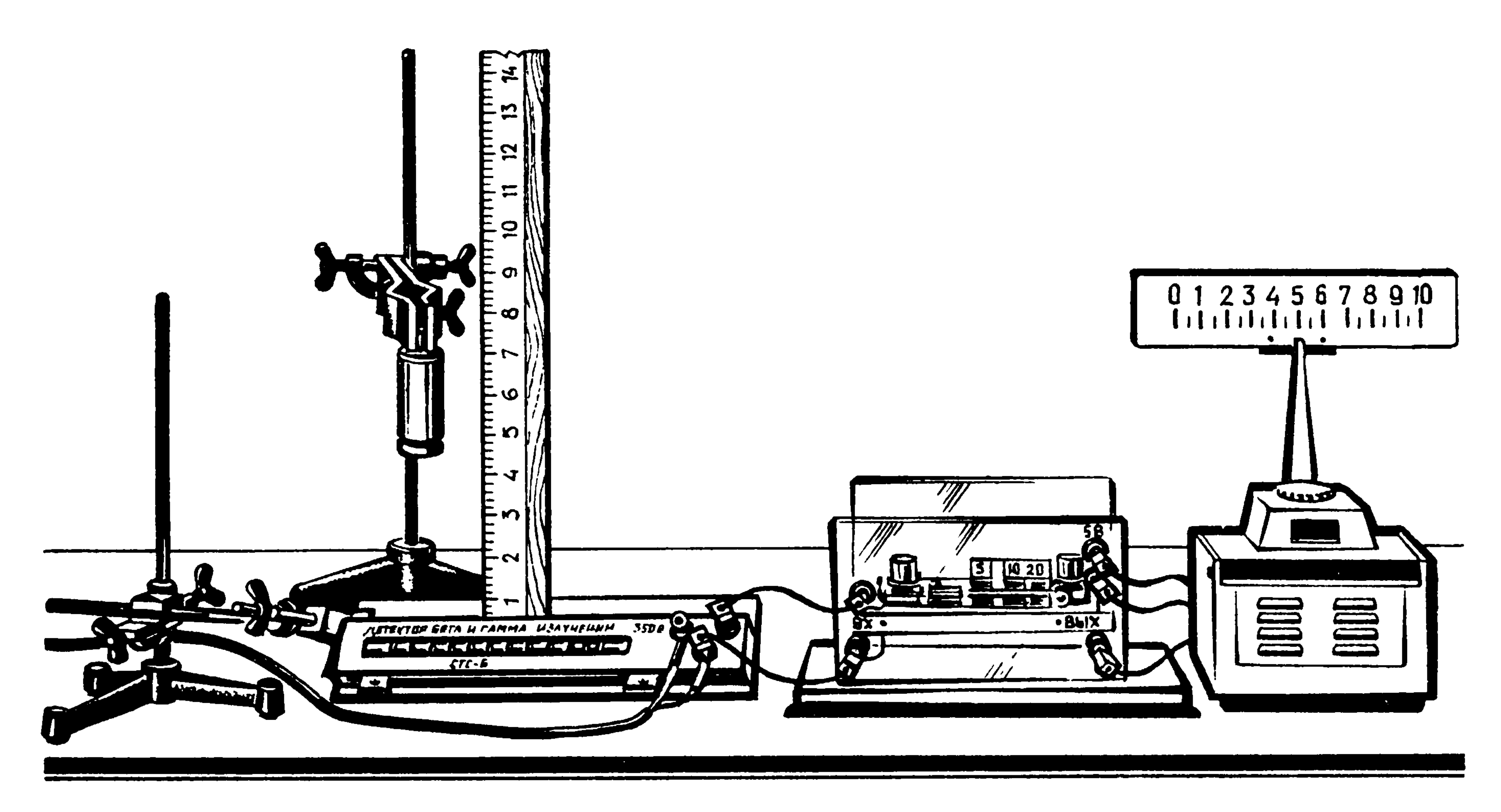


Рис. 213

ком ионизирующих излучений и детектором. Опыт успешно получается при использовании точечного источника ионизирующих излучений, в роли которого можно использовать светящийся «глазок» от старого тумблера или стрелку со светомассой, слегка утопленные в плексигласовом держателе.

Опыт 220. Поглощение бета-частиц

Бета-излучение обладает непрерывным распределением энергии, т. е. в излучении присутствуют частицы с различными значениями энергии. Каждый источник бета-частиц характеризуется присущим только ему значением максимальной энергии частиц. Так как масса бета-частиц (электронов) очень мала, то при прохождении сквозь слой поглощающего вещества вследствие взаимодействия с электронами оболочек атомов и их ядрами они легко отклоняются от первоначального направления движения и постепенно теряют энергию. Поэтому под длиной пробега бета-частиц понимают не пройденный путь, а толщину слоя вещества по направлению первоначального движения, в котором они полностью тормозятся.

Собирают установку по схеме предыдущего опыта, определяют фоновое значение скорости счета. Над детектором в штативе укрепляют источник бета-частиц. Между ним и трубкой СТС-6 будут помещать (укладывать на детектор) алюминиевые пластины-поглотители. При отсутствии поглощающих пластин интенсиметр показывает максимальную скорость счета (начальную интенсивность бета-излучений). Затем укладывают одну пластинку-поглотитель известной толщины и отмечают уменьшение скорости счета. Аналогично продолжают опыты с 2, 3 и т. д. пластинами. Толщину слоя алюминия увеличивают до тех пор, пока показания скорости

счета не сравняются с фоновым значением. Из опыта следует, что интенсивность излучений резко падает уже в начале пути сквозь поглотитель, так как бета-частицы с малой энергией поглощаются интенсивнее.

Если по результатам этого опыта построить график зависимости скорости счета (интенсивности бета-излучений) от толщины слоя алюминия или числа пластин одинаковой толщины, то, используя его и описанную демонстрационную установку, можно показать широко применяемый в промышленности метод бесконтактного измерения и контроля толщины материалов. Для этого в промежуток между источником бета-частиц и детектором вносят алюминиевую пластину. Ее толщина должна быть в пределах 0,2—0,4 мм. Интенсиметр показывает значительное уменьшение скорости счета. Используя график зависимости интенсивности бета-излучений от толщины слоя алюминия для полученной скорости счета, оценивают толщину алюминиевой пластины. После этого проверяют результат, измерив пластину микрометром.

Опыт 221. Принцип гамма-дефектоскопии

Гамма-дефектоскопия широко применяется в промышленности для контроля качества литья, поковок, сварочных работ и т. д. Демонстрацию ее принципа можно осуществить, применяя самодельное оборудование и установку предыдущего опыта. Образец, представляющий собой две свинцовые пластины толщиной 1—3 мм, помещенные в тонкостенный алюминиевый футляр так, что между пластинами создан зазор шириной примерно 10 мм, укрепляют в штативе между источником ионизирующих излучений и детектором с газоразрядной трубкой СТС-8 или СТС-6. Перемещают образец несколько раз и замечают по показаниям интенсиметра, как изменяется скорость счета. На основе наблюдений делают вывод о наличии дефекта, а также определяют его форму и место нахождения. После этого вскрывают футляр и демонстрируют наличие зазора (дефекта) между свинцовыми пластинами в том месте, где и ожидалось по результатам опыта.

Опыт 222. Отклонение бета-частиц в магнитном поле

Собирают установку по рисунку 214. На подставку укладывают дроссельную катушку на U-подобном сердечнике от универсального трансформатора. Устанавливают зазор между полюсными наконечниками шириной 10 мм. С левой стороны от зазора размещают излучатель бета-частиц со свинцовым коллиматором, а с правой устанавливают параллельно зазору детектор с трубкой СТС-6 так, чтобы между источником бета-частиц и трубкой было расстояние 70—75 мм. Непосредственно возле трубки вдоль ее

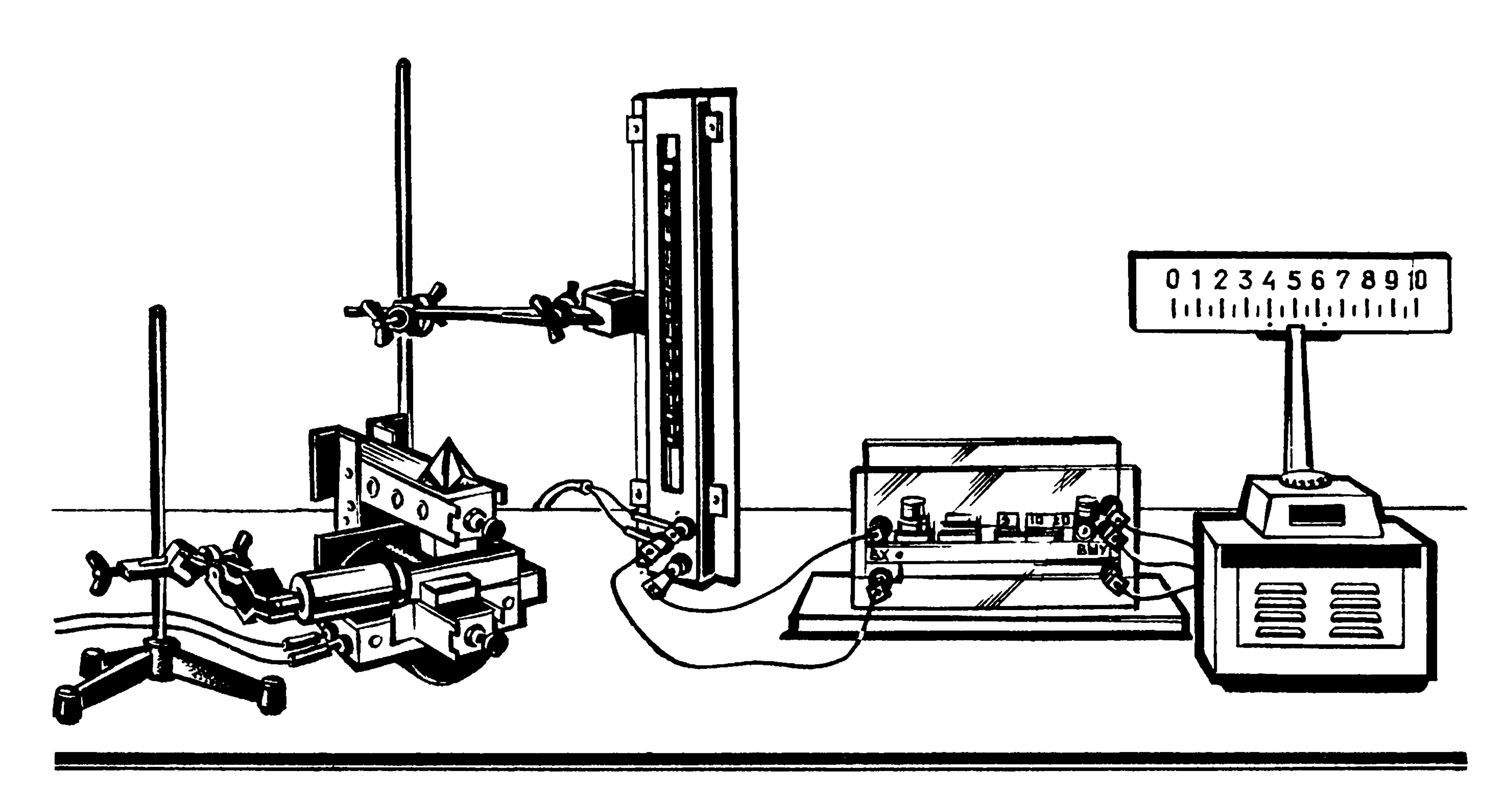


Рис. 214

оси размещают алюминиевую пластину и добиваются, чтобы в ее отверстие попадало ионизирующее излучение. При включении установки (электромагнит отключен) интенсиметр фиксирует некоторую скорость счета. Если по катушке электромагнита пропустить ток от выпрямителя ВС-24М, то вследствие отклонения бета-частиц в магнитном поле они перестанут попадать в отверстие алюминиевой пластины, и интенсиметр зафиксирует резкое уменьшение скорости счета. Переместив алюминиевую пластину влево или вправо вдоль трубки, находят такое положение отверстия, при котором интенсиметр вновь зафиксирует заметное увеличение скорости счета. Увеличивают силу тока в катушке, что приводит к увеличению индукции магнитного поля в зазоре, и отмечают, что бета-частицы отклоняются на еще больший угол. Если изменить направление тока в катушке на противоположное, то легко продемонстрировать отклонение бета-частиц в другую сторону.

Опыт 223. Демонстрация треков альфа-частиц в камере Вильсона

Наряду с методами регистрации отдельных частиц в ядерной физике широко распространены так называемые трековые детекторы, позволяющие наблюдать след (трек), который «оставляет» заряженная частица при определенных внешних условиях в веществе.

В школьном учебном эксперименте методы трековых камер представлены камерой Вильсона, названной так в честь ее создателя — английского физика Ч. Вильсона. Современный ее демонстрационный вариант — камера для наблюдения следов альфа-частиц — представляет собой пластмассовое кольцо, имеющее круговые каналы, соединенные со штуцером. С торцов камера ограничена двумя

прозрачными плексигласовыми пластинами, приклеенными к кольцу. Рабочий объем камеры сообщается с круговыми каналами через две кольцевые щели, которые образованы строго выдержанными зазорами (0,03 мм) между внутренним бортиком камеры и прозрачными пластинами, что препятствует вихревому движению воздуха. Боковая поверхность камеры имеет два противоположно размещенных отверстия. Через одно из них посредством резьбы М6 ввинчивается держатель с источником альфа-частиц АК-30. В другое отверстие вставлен штуцер для соединения с трубкой от резиновой груши. На резиновой трубке имеется винтовой зажим.

Действие камеры основано на конденсации перенасыщенных паров смеси этилового спирта, ацетона и воды на ионах, которые образуются в газах при прохождении через них альфа-частиц. При медленном сжатии резиновой груши и последующем быстром ее расширении происходит адиабатное расширение воздуха, чем и достигается необходимое для перенасыщенного состояния охлаждение паров.

Камеру для наблюдения следов альфа-частиц устанавливают на конденсор подготовленного к работе проекционного аппарата с приспособлением для горизонтального проецирования (рис. 215). Перед проведением опыта в резиновую грушу пипеткой вводят 2—3 капли смеси спирта, ацетона и воды, после чего грушу присоединяют с помощью резиновой трубки к камере. Несколько раз (3—8) сжимают и отпускают грушу, т. е. вводят пары смеси непосредственно в камеру. Далее равномерно натирают сукном верхнюю плексигласовую поверхность камеры, создавая этим электрическое поле, под действием которого из внутренней части камеры будут устраняться ионы, образующиеся в газе под действием непрерывного альфа-излучения.

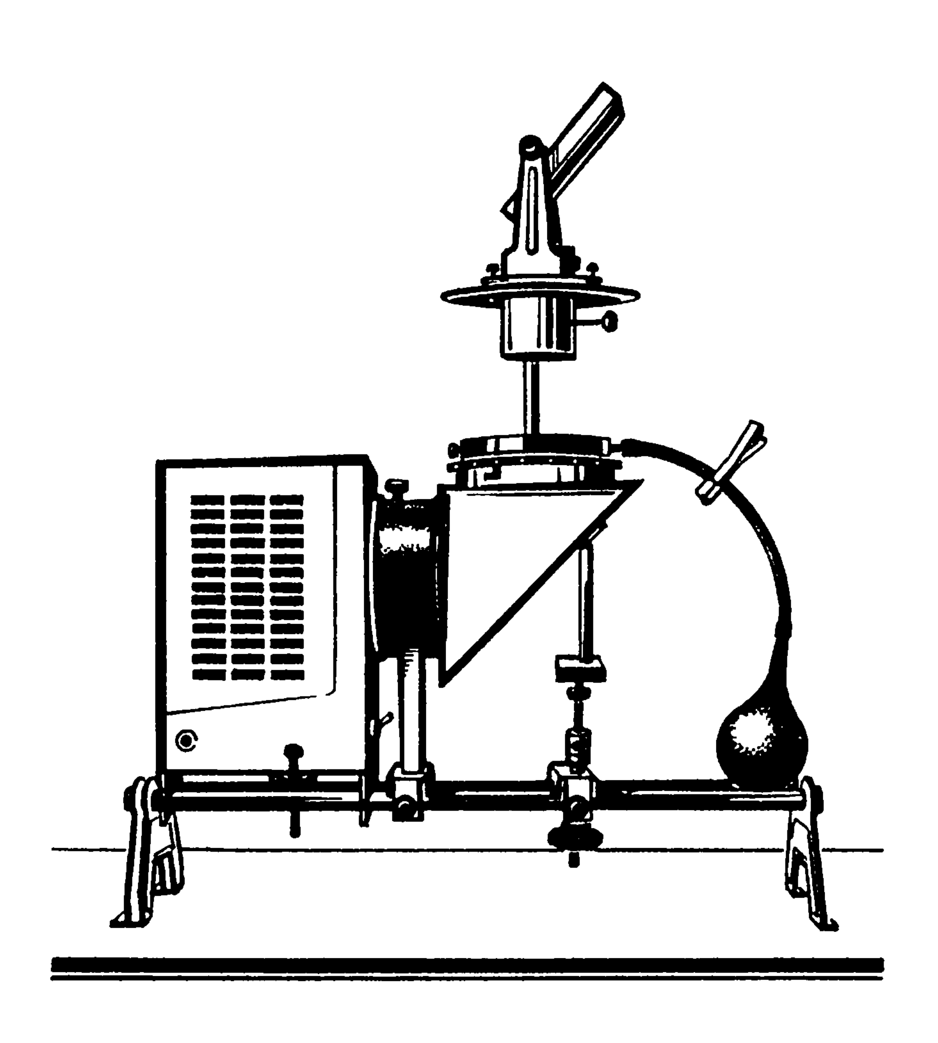


Рис. 215

Включая проекционный аппарат и передвигая объектив, добиваются четкого изображения на экране кольца источника альфа-частиц АК-30. Внимание учащихся акцентируют на изображении этого кольца с нанесенными на него радионуклидами плутоний-239. Несколько раз медленно сжимают резиновую грушу, а затем резко отпускают, находят оптимальное сжатие, при котором получается наилучшая видимость треков альфа-частиц. Опыт необходимо повторить несколько раз, поскольку треки отчетливо видны в течение 1,5—2 с после расширения газа. Отмечают, что треки представляют собой тонкие прямолинейные туманные полоски, все они начинаются на поверхности кольца источника АК-30, почти все имеют одинаковую длину.

Качество демонстрации зависит от сохранности прозрачных поверхностей камеры, степени сжатия, которое должно быть в пределах 1,32—1,36, равномерности распределения электрического заряда на плексигласовых пластинах.

Раздел III. САМОДЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Ниже описано сравнительно простое самодельное оборудование, изготовление которого по силам учащимся старших классов в школьных мастерских. Это оборудование, пополнив ныне выпускаемое промышленностью, вместе с ним составит единый, внутренне согласованный комплект.

§ 16. Оборудование к теме «Колебания»

1. Вибратор демонстрационный. Для постановки многих опытов необходим механический аналог звукового генератора, т. е. такой прибор, в котором одна из его деталей совершала бы синусоидальные колебания, частоту и амплитуду которых можно было бы изменять. В технике такие приборы называются синусными механизмами. В основе синусных механизмов, как правило, лежит механизм, превращающий вращательное движение в колебательное, совершающееся по закону:

$$x = X_m \sin \omega t,$$

где x — смещение; X_m — максимальное смещение; ω — угловая скорость вращения вала двигателя (или редуктора).

Синусные механизмы, используемые в технике, непригодны для использования в школьном физическом эксперименте, так как не удовлетворяют его специфическим требованиям.

Анализ демонстрационных опытов показал, что синусный механизм (который мы для простоты назовем вибратором), необходимый для постановки демонстрационных опытов, должен обладать следующими основными свойствами:

1. Устройство вибратора должно быть предельно простым, наглядным и понятным для учащихся.

2. Конструкция вибратора должна позволять просто и надежно его сочленять с другими приборами комплекта.

3. Частота колебаний вибратора должна плавно регулироваться в пределах от 0,2 до 10—15 Гц.

4. Амплитуда колебаний должна плавно регулироваться в пределах от 10 до 50 мм.

Такими свойствами и обладает вибратор, описанный ниже (рис. 216).

Вибратор собран на базе двигателя *1* с червячным редуктором *2* (можно, например, использовать двигатель от автомобильного стеклоочистителя).

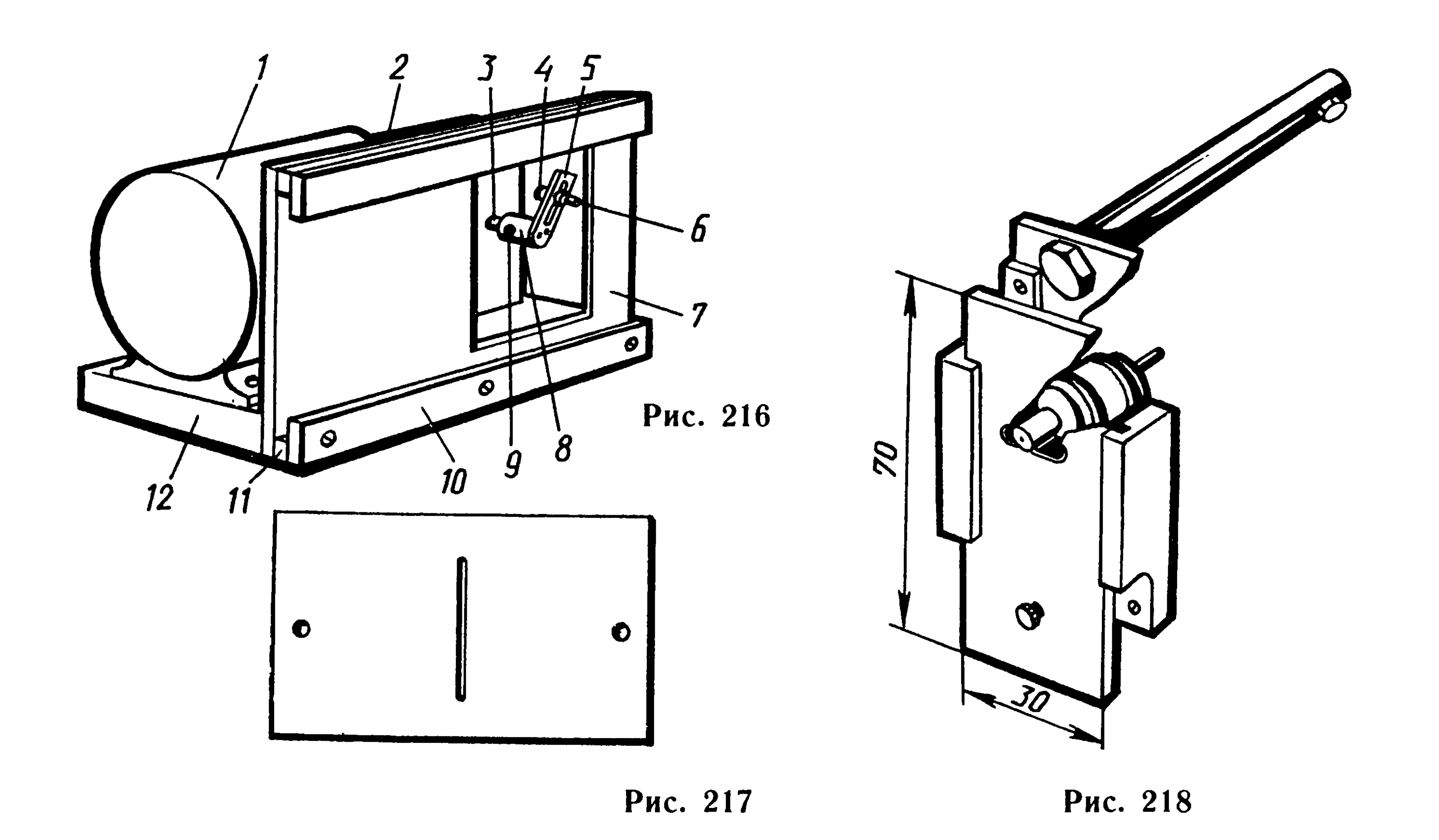


Рис. 216

Рис. 217

Рис. 218

Основание прибора *12* сделано из нескольких листов толстой фанеры, которые склеены казеиновым клеем. Высота основания берется такой, чтобы вал *3* редуктора оказался поднятым над поверхностью стола примерно на 100 мм.

На вал редуктора надевается стальная муфта *8*, конец которой должен на 1 мм выходить за основание двигателя. Муфта закрепляется на валу винтом *9*.

К муфте двумя винтами крепится кривошип *5* с прорезью для установки пальца *6* (последний крепится с помощью гайки *4*).

Расстояние от оси пальца до оси вала редуктора определяет амплитуду колебаний. Палец кривошипа должен выступать за кромку основания на 10—12 мм.

Кривошип испытывает значительные усилия, и его надо изготовить из стальной пластины толщиной 1,5—2 мм.

К основанию прибора крепится направляющая стойка *10*, изготовленная из толстой фанеры. Высота стойки 200 мм, а ее длина равна длине основания. В стойке вырезано квадратное отверстие со стороной 65 мм. Точка пересечения диагоналей этого отверстия совпадает с осью вала редуктора. Внутри образовавшейся полости вращается кривошип с пальцем.

Пластины *11* и *10*, крепящиеся к раме, образуют направляющие пазы, по которым ходит шток. Последний представляет собой пластину с вертикальным пазом (рис. 217).

Длина штока больше длины направляющей стойки на 100 мм. Ширина штока на 1 мм меньше расстояния между пластинами *11*.

Вибратор собирают из изготовленных деталей в такой последовательности:

1. Двигатель с редуктором крепят к основанию.
2. На вал редуктора надевают муфту.

3. К муфте крепят кривошип.

4. В прорези кривошипа устанавливают палец.

5. Включают двигатель на пониженное напряжение и проверяют, не задевает ли кривошип за основание прибора.

6. К стойке крепят пластины, образующие верхний паз направляющего устройства.

7. К стойке крепят пластины, образующие нижний паз направляющего устройства (но винты не затягивают).

8. В направляющее устройство вставляют шток.

9. Направляющее устройство крепят к основанию двигателя. При этом палец кривошипа должен войти в паз штока.

Если все детали изготовлены правильно, то вибратор работает устойчиво и бесшумно.

2. Вибратор к волновой ванне. Выпускаемый к волновой ванне пружинный вибратор имеет существенный недостаток: его колебания быстро затухают, и картина распространения волн в результате этого получается невыразительной и кратковременной. Поэтому целесообразно изготовить миниатюрный вибратор, аналогичный демонстрационному. В этом вибраторе можно использовать микродвигатель «Малютка» с редуктором. Внешний вид вибратора показан на рисунке 218. Число оборотов двигателя почти линейно зависит от напряжения; поэтому частоту колебаний штока вибратора можно легко изменять, изменяя напряжение питания.

Вибратор работает стабильно со строго постоянной частотой колебаний, которую можно плавно регулировать в пределах от 1 до 10 Гц.

Амплитуда колебаний штока вибратора плавно регулируется в пределах от 0 до 2 мм в зависимости от используемой насадки. Это достигнуто следующим образом. На вал *О* двигателя плотно насажен эксцентрик *А* (рис. 219, *а*). Расстояние OO_1 между осью вала двигателя и центром эксцентрика равно 2 мм. Диаметр этого эксцентрика 6 мм.

На эксцентрик *А* надет второй эксцентрик *В* (рис. 219, *б*). Расстояние O_1O_2 между центрами окружностей эксцентриков также

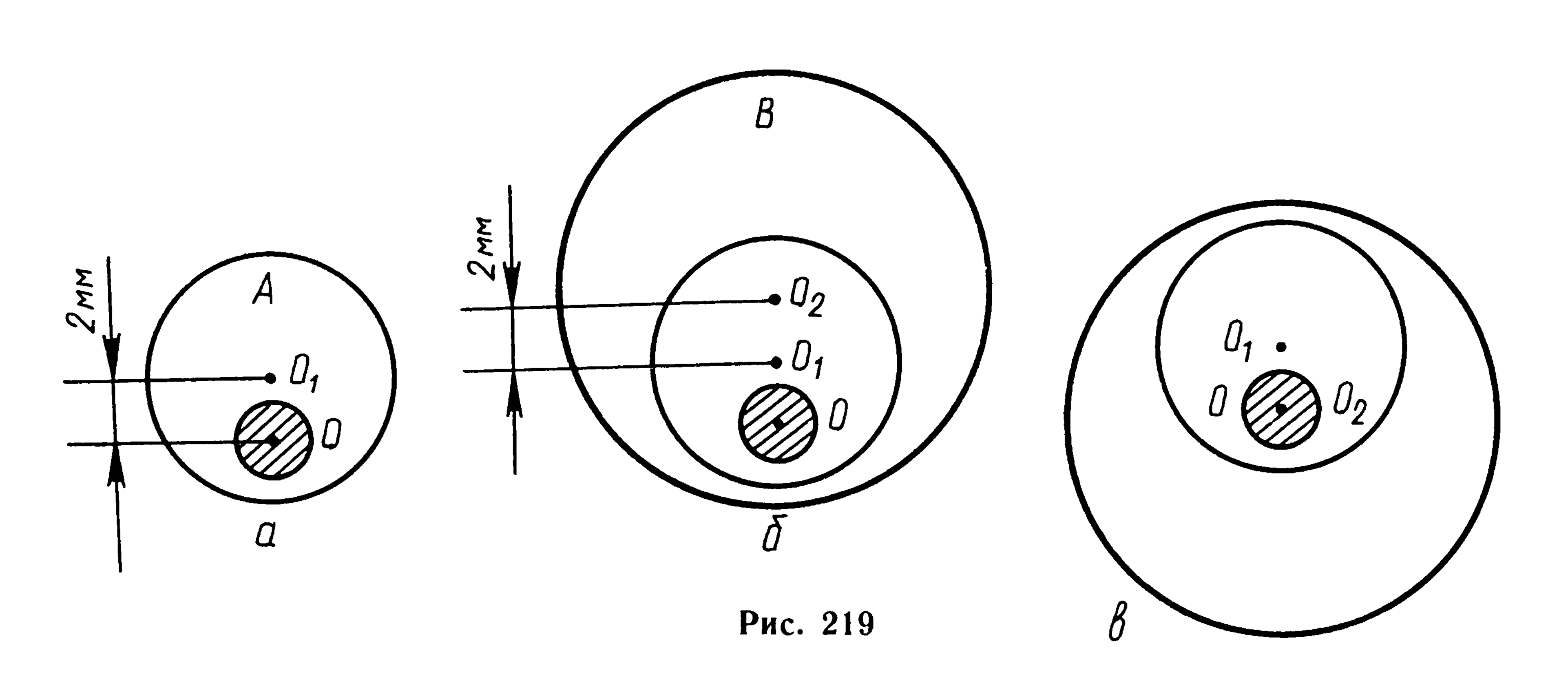


Рис. 219

равно 1 мм. Поворотом эксцентрика *В* можно изменять смещение центра последнего относительно оси вала двигателя в пределах от 0 до 2 мм.

На рисунке 219, *б* показано такое положение эксцентрика *В*, при котором его центр смещен по отношению к центру оси вала двигателя на 2 мм. На рисунке 219, *в* показано положение эксцентрика *В*, при котором его центр совпадает с центром оси вала двигателя и амплитуда колебаний штока равна нулю. Эксцентрик *В* закрепляется на эксцентрике *А* с помощью зажимного винта.

3. Двигатель с постоянным числом оборотов. Такой двигатель используется в некоторых опытах по кинематике прямолинейного равномерного движения и во многих опытах по разделу «Колебания и волны». Наиболее подходящим оказался асинхронный конденсаторный двигатель с редуктором (например, типа Д-83). Такие двигатели применяются в лентопротяжных механизмах магнитофонов.

Для удобства использования двигателя в демонстрационных опытах его целесообразно поместить в кожух, из которого должен выступать хвостовик вала. На кожухе следует установить кнопку для включения и остановки двигателя. В кожух помещают и конденсатор. Основание кожуха для устойчивости следует утяжелить.

4. Пружинный маятник. Прибор предназначен для демонстрации вынужденных колебаний. Он смонтирован на вертикальной панели серого цвета (рис. 220, *а*) и состоит из двух одинаковых пластин, соединенных между собой спиральной пружиной: наружный конец пружины прикреплен к одной пластине, а внутренний — к другой. Ось прибора имеет форму, изображенную на рисун-

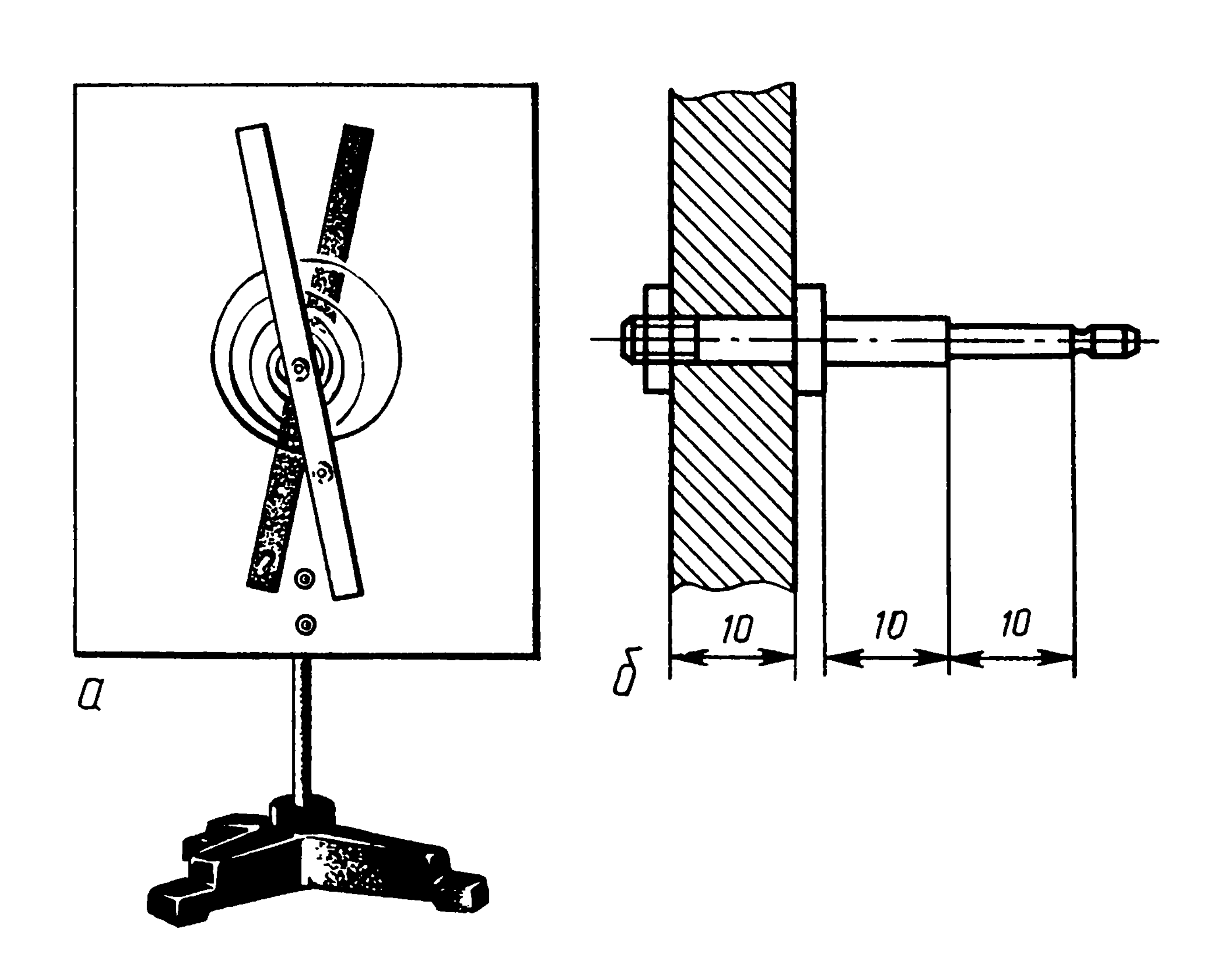


Рис. 220

ке 220, *б*. С помощью винта можно регулировать степень деформации пружины и тем самым менять взаимное расположение пластин перед началом опыта. Одна из пластин может быть присоединена к вибратору.

5. Прибор Н. И. Триллера. Внешний вид прибора был представлен на рисунках 83, *а* и *б*.

Основание прибора должно быть массивным и устойчивым. Его лучше всего в условиях школы изготовить из древесностружечной плиты (ДСП). Размер основания некритичен. Изготовленный нами образец имел длину 1 500 мм и ширину 300 мм. Для установки прибора следует использовать основания от универсальных штативов (рис. 221).

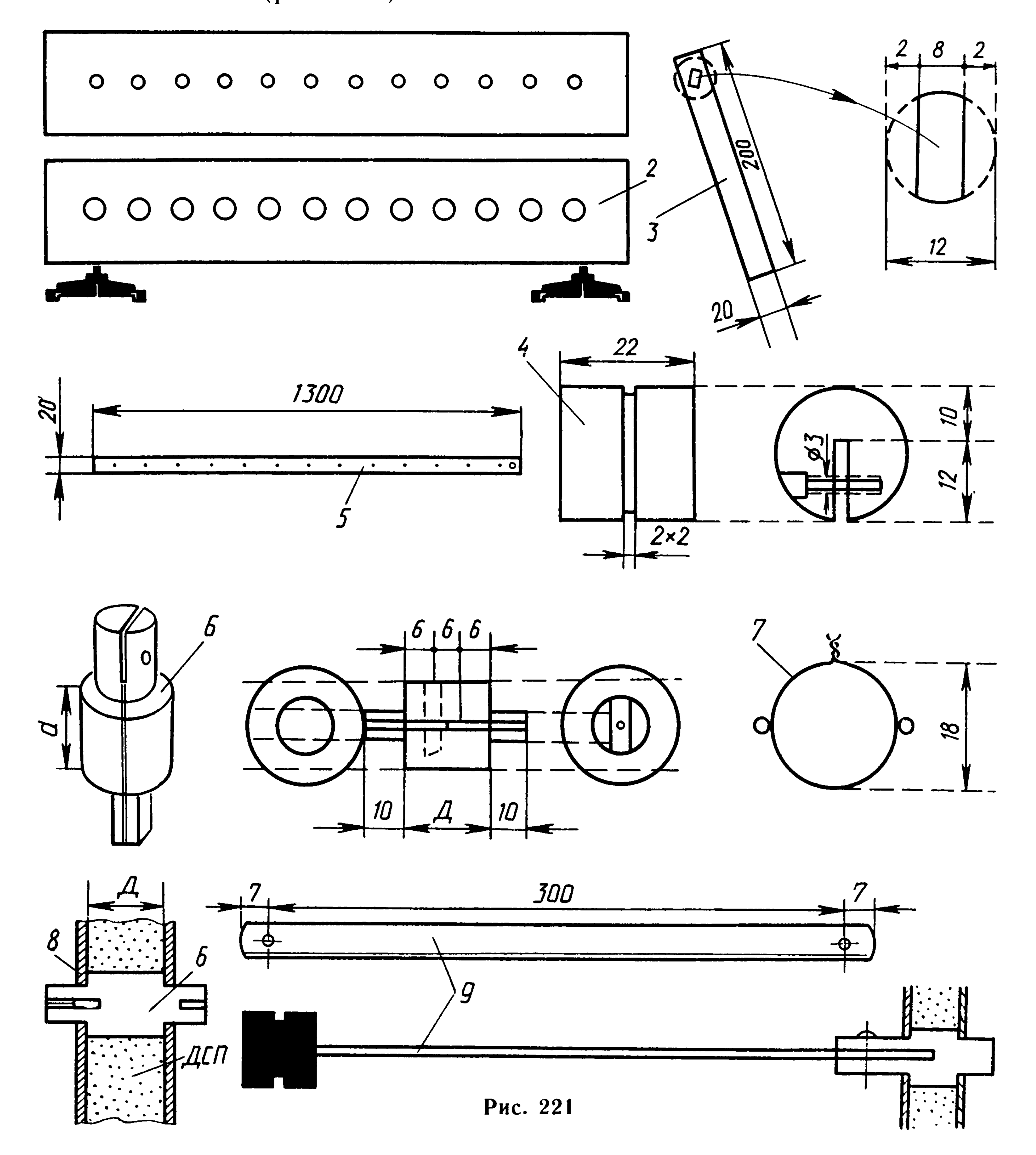


Рис. 221

На расстоянии 200 мм от нижнего края основания *2* следует просверлить на равном расстоянии друг от друга 13 отверстий. (В нашем приборе их по ошибке было сделано 12, что создало в ряде опытов дополнительные трудности.)

В отверстия необходимо вставить втулки, которые удобно изготовить из обрезка водопроводной трубы малого диаметра. Поэтому диаметр отверстий в основании прибора должен быть равен внешнему диаметру втулок. Втулки лучше всего установить на клею. Для этой цели пригоден любой клей, склеивающий дерево с металлом (например, универсальный клей «Момент»).

По размерам втулок надо изготовить 13 креплений для маятников *6*. Диаметр и длина средней части крепления определяются размером втулки, а диаметр наружных частей — шириной упругой пластины маятника. Длина выступающих частей крепления около 10 мм. Спереди крепление, как и центральная часть, имеет цилиндрическую форму. Однако часть крепления, выходящая на тыльную часть прибора, имеет квадратную форму. Вдоль крепления тонкой ножовкой пропиливается паз. Глубина паза такова, что наружная часть пропиливается насквозь. В этот паз на клею, склеивающем металл с металлом, вставляется упругая пластина маятника *9* и закрепляется винтом.

В качестве упругих пластин можно использовать тонкие, бывшие в употреблении ножовочные полотна ($l=310$ мм, $d=12$ мм).

Грузы маятников *4* имеют цилиндрическую форму диаметром и высотой 20—25 мм, массой около 60 г. В кольцевом пазу цилиндра укрепляется свободно вращающееся вокруг цилиндра проволочное кольцо для пружинки (или резинки) связи.

Для того чтобы крепления маятников *6* не выпали из втулок, сзади и спереди основания прикрываются масками *8* из фанеры. Маски имеют такие же размеры, как и основания, но диаметр отверстий в них равен ширине упругих пластин.

Сборка прибора ведется следующим образом. Основание прибора прикрывается черной маской. Затем в основание вставляются крепления маятников с закрепленными в них упругими пластинами. После этого на основании закрепляется задняя маска. Затем на прямоугольные выступы креплений надеваются и винтами через шайбы закрепляются рычаги. После этого, установив пружины маятников горизонтально, концы рычагов закрепляют (не жестко!) винтами в соединительной планке-ручке. Наконец, на свободные концы пластин надевают и закрепляют грузы. После соединения грузов пружинками (или резинками) одинаковой длины и жесткости прибор готов к демонстрации.

6. Генератор прямоугольных импульсов. Генератор прямоугольных импульсов можно собрать (в зависимости от имеющихся деталей) по одной из следующих схем:

а) Генератор на неоновой лампе или тиратроне МТХ-90 собирается по схеме, изображенной на рисунке 222, *а*. Прямоугольные импульсы снимаются с клемм *1* и *2*. Переменные резисторы *R1*—500 кОм, а *R2*—100 кОм, *R3*—12 кОм.

б) Генератор на стабилитронах Д817Г. Полупроводниковые стабилитроны составляют группу полупроводниковых диодов, рабочая точка которых в отличие от обычных диодов в нормальном режиме лежит на участке вольт-амперной характеристики, соответствующем состоянию пробоя $p - n$-перехода. В таком режиме напряжение на приборе сохраняется примерно постоянным при изменении протекающего тока. Одним из параметров полупроводниковых стабилитронов является напряжение пробоя или напряжение стабилизации. В настоящее время отечественная промышленность выпускает серийно приборы с напряжением стабилизации от 5 до 400 В при допускаемом разбросе номинальных значений $\pm 10\%$.

Стабилитроны с успехом можно применять в школьном учебном физическом эксперименте для формирования прямоугольных, пилообразных и других импульсов. Схема прибора для формирования прямоугольных импульсов приведена на рисунке 222, *б*. Напряжение, снимаемое со школьного звукового генератора через резистор *R*, подводится к стабилитронам. Стабилитрон *Д1* полностью срезает отрицательные полупериоды напряжения и ограничивает

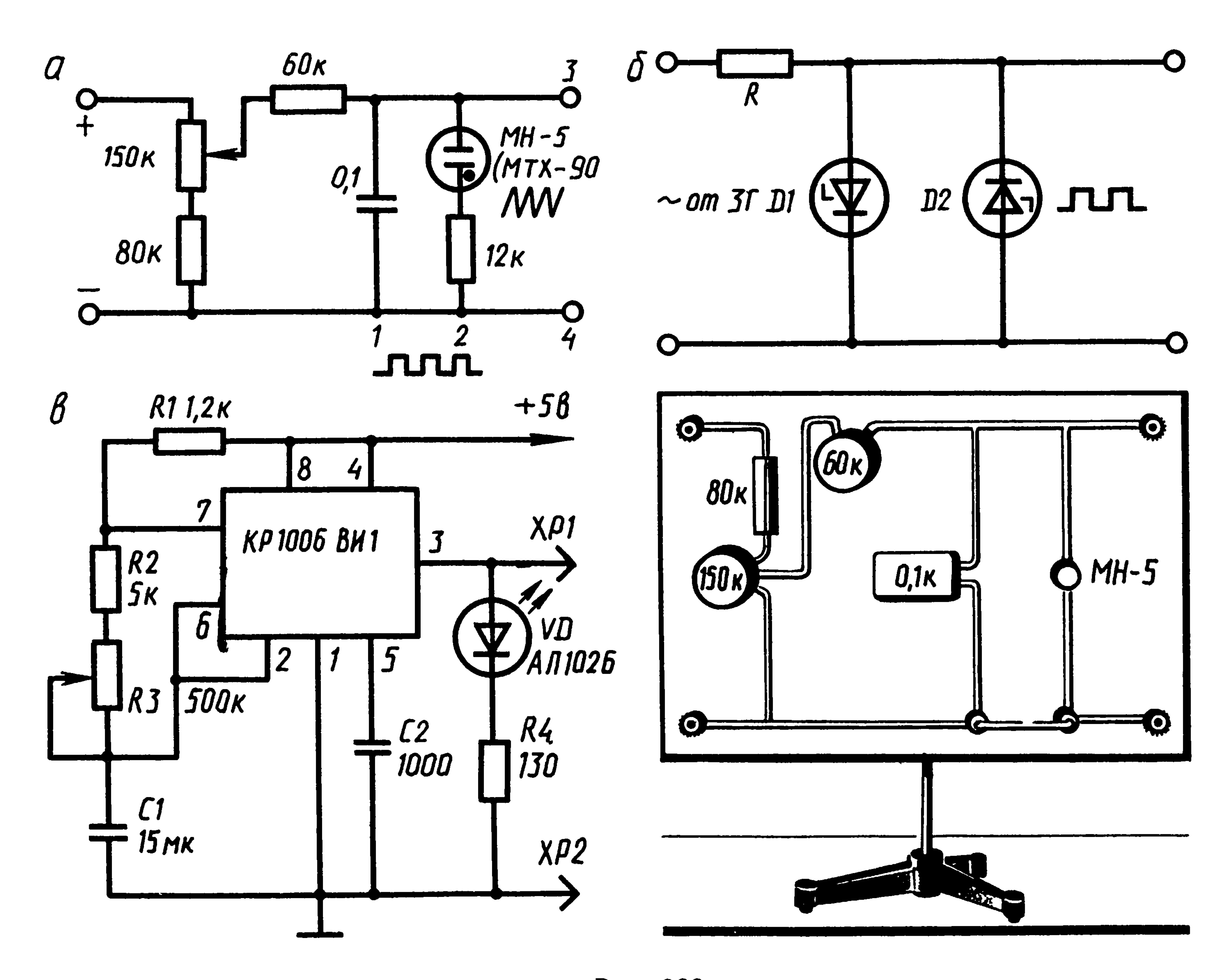


Рис. 222

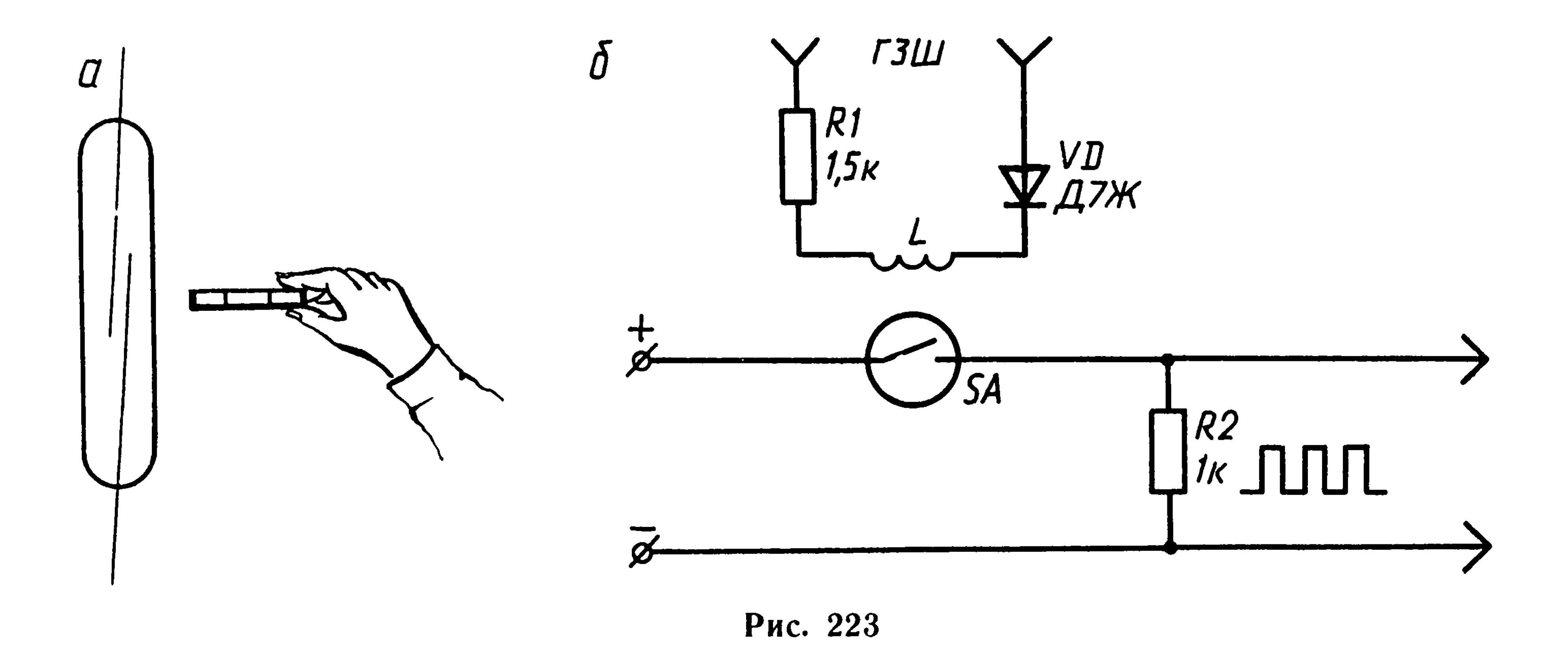


Рис. 223

положительные до значения стабилизации. Стабилитрон включен в обратном направлении. Благодаря этому на выходе появляются прямоугольные импульсы с частотой следования в зависимости от частоты настройки генератора и амплитудой, равной напряжению стабилизации.

В приборе применены стабилитроны типа Д817Г и резисторы сопротивлением $R=80$ Ом. Монтаж выполнен толстым медным проводом на тыльной стороне панели. Частота прямоугольных импульсов равна частоте звукового сигнала и может плавно регулироваться в пределах от 20 Гц до 20 кГц.

в) Генератор на микросхеме КР1006ВИ1 собирается по схеме, изображенной на рисунке 222, *в*. Период повторения импульсов определяется сопротивлением включенной части резистора *R3* и электроемкостью конденсатора *C1* и может изменяться в пределах от 0,005 до 5 с.

г) Генератор на герконе. Герконами называют герметизированные магнитоуправляемые контакты. Внешний вид и устройство геркона представлены на рисунке 223, *а*. Контакты геркона замыкаются (у одного типа) или размыкаются (у другого типа) под действием магнитного поля. Схема генератора прямоугольных импульсов на герконе КЭМ-1 показана на рисунке 223, *б*. Геркон помещается внутрь специальной катушки (4000 витков), которая через диод Д7Ж и резистор *R1* питается от звукового генератора. Источником импульсов является батарейка от карманного фонаря.

7. Генератор пилообразного напряжения. Генератор пилообразного напряжения можно собрать по одной из нижеприведенных схем:

а) Наиболее просто пилообразные импульсы можно снимать с клемм *3—4* генератора прямоугольных импульсов, собранного на неоновой лампе или тиратроне (см. рис. 222, *а*). В этом случае клеммы *1—2* надо соединить проводящей перемычкой.

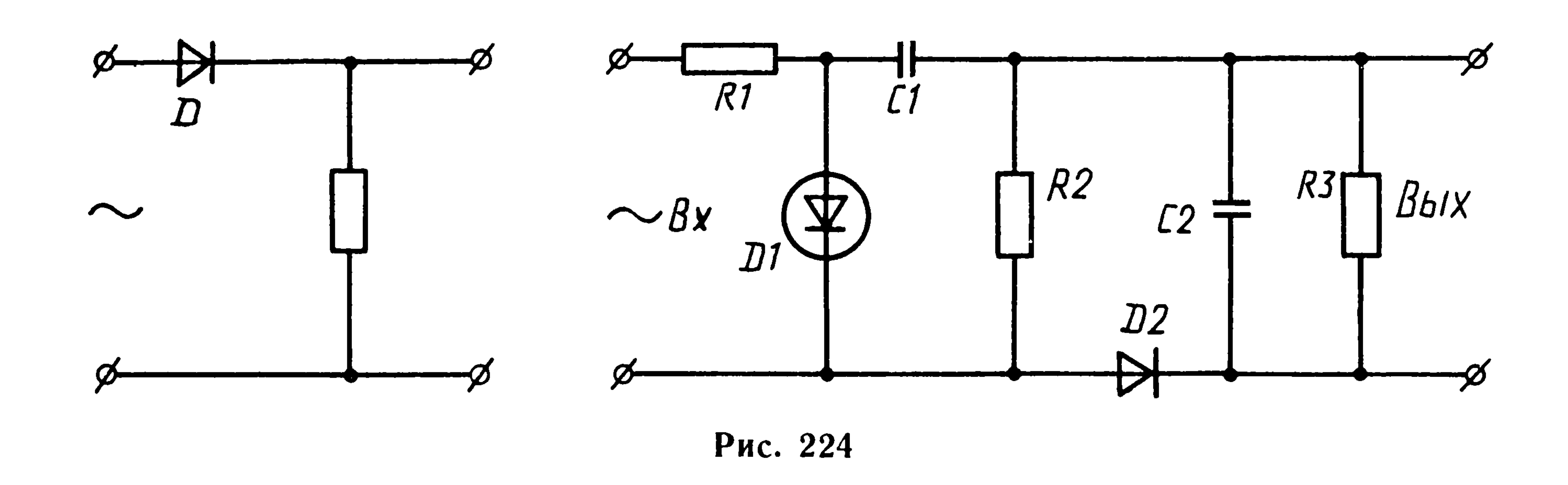


Рис. 224

б) На рисунке 224 показана схема генератора пилообразных импульсов на стабилитроне. Напряжение, снимаемое со школьного звукового генератора, сначала преобразуется с помощью стабилитрона *D1* типа Д-8151 и резистора *R1* из синусоидального в прямоугольное с амплитудой 8—10 В. Затем прямоугольное напряжение поступает на дифференцирующую цепочку *C1 — R2,* которая служит для укорочения импульсов. Короткие импульсы заряжают периодически конденсатор *C2,* который медленно разряжается через резистор *R3* (примерно до 25% от исходного напряжения).

Когда приходит следующий импульс, конденсатор *C2* дозаряжается, а затем снова разряжается. С резистора *R3* снимается пилообразное напряжение. Номинальные значения сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов следующие: $R_1 = 160$ Ом, $R_2 = 100$ Ом, $R_3 = 1$ кОм, $C_1 = 0{,}1$ мкФ, диод типа Д7Ж.

8. Переключатель к осциллографу. В методической литературе описано более сотни схем двухканальных переключателей на электронных лампах и полупроводниковых приборах. Однако все эти схемы обладают как минимум двумя недостатками. Во-первых, они сложны и потому непонятны учащимся. Во-вторых, их трудно воспроизвести силами учащихся. Известный методист Н. Я. Молотков, много лет занимающийся школьным учебным экспериментом, предложил довольно простую схему двухканального переключателя на герконах. Схема переключателя приведена на рисунке 225, *а.* Для наглядности часть схемы, связанная с коммутацией сигналов, и часть, связанная с управлением коммутацией, показаны по-разному. На рисунке 225, *б* показан внешний вид передней панели переключателя. Изолированные провода проложены вдоль нарисованных линий схемы, а герконы (вместе с катушками) установлены на изображениях пластин контактов. Цепь управления собрана на обратной стороне панели.

Переключатель работает следующим образом. Схема включения обмоток катушек герконов такова, что в течение полупериода

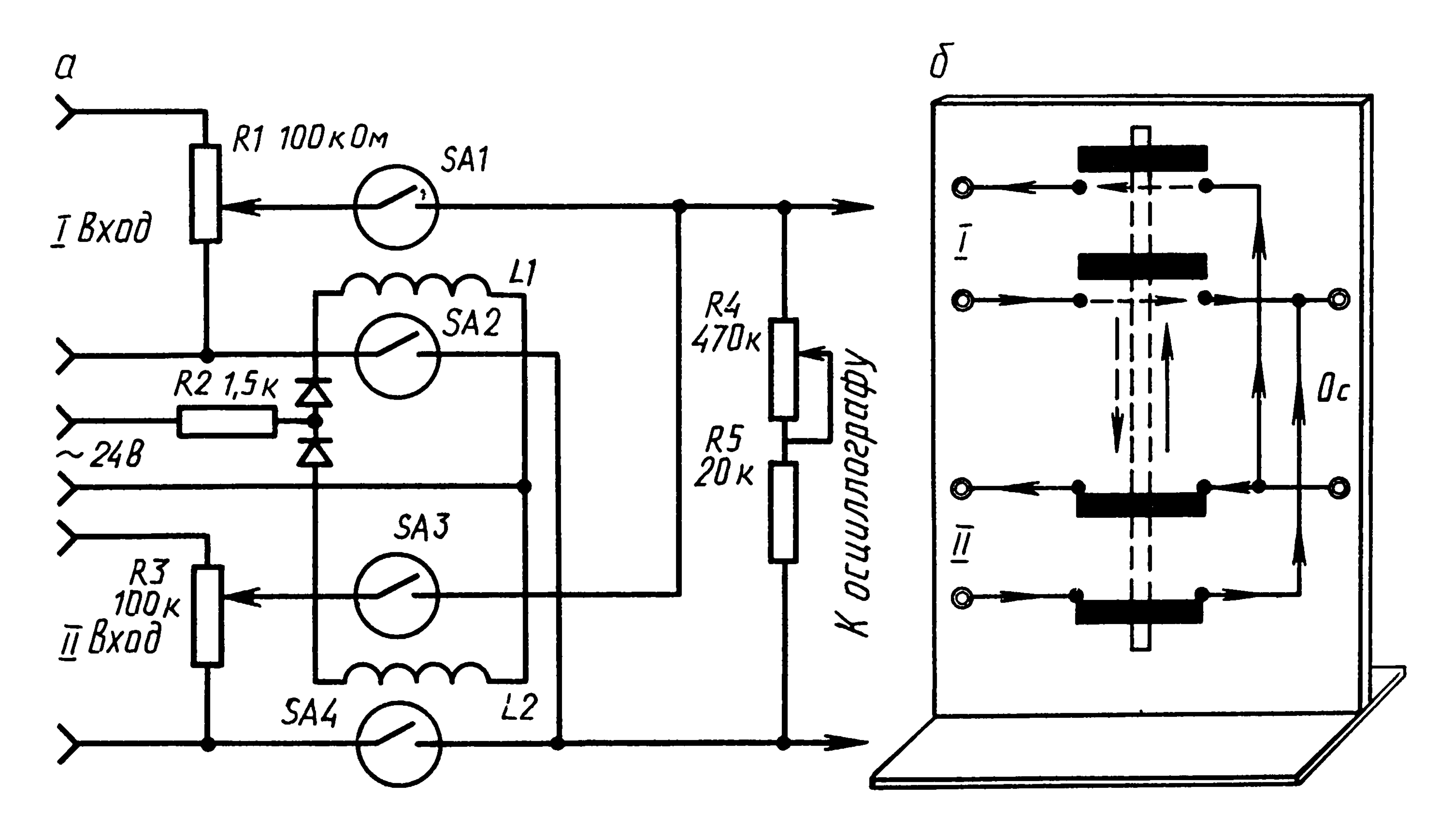


Рис. 225

подключается одна пара катушек (допустим, нижняя), а в течение следующего полупериода другая (верхняя). Соответственно будут замкнуты контакты то одной, то другой пары герконов, а потому будет подключен то один, то другой вход переключателя.

Резисторы *R1* и *R2* позволяют регулировать напряжение подаваемых на вход осциллографа сигналов.

Промышленность выпускает три типа герконов: герконы, предназначенные для замыкания цепи; герконы, предназначенные для переключения; герконы, предназначенные для замыкания в поляризованном реле. Для переключателя пригодны герконы КЭМ-1, КЭМ-2. Катушка, управляющая состоянием контактов геркона, должна иметь примерно 4 000 витков. (Иногда герконы выпускаются вместе с катушками. В этом случае катушка имеет 4 170 витков.)

9. Простейший анализатор спектра. Простейшим спектральным прибором для периодических электромагнитных колебаний может быть перестраиваемый колебательный контур (рис. 226) с большой добротностью.

Катушка индуктивности содержит 500 витков провода марки ПЭЛ-0,5, намотанного на сердечник марки ОБ-48. С этой катушкой соединяется последовательно вторичная обмотка трансформатора связи *Тр*.

Трансформатор связи собран на сердечнике ОБ-20. Его первичная обмотка *L1* содержит 300 витков провода ПЭЛ-0,1, а вторичная *L2* — 10 витков провода ПЭЛ-0,5. В контуре имеются переключаемые конденсаторы постоянной емкости $C_1 = 10\,000$ пФ и $C_2 = 3\,000$ пФ и конденсатор переменной емкости $C_3 = 450$ пФ$\times$2.

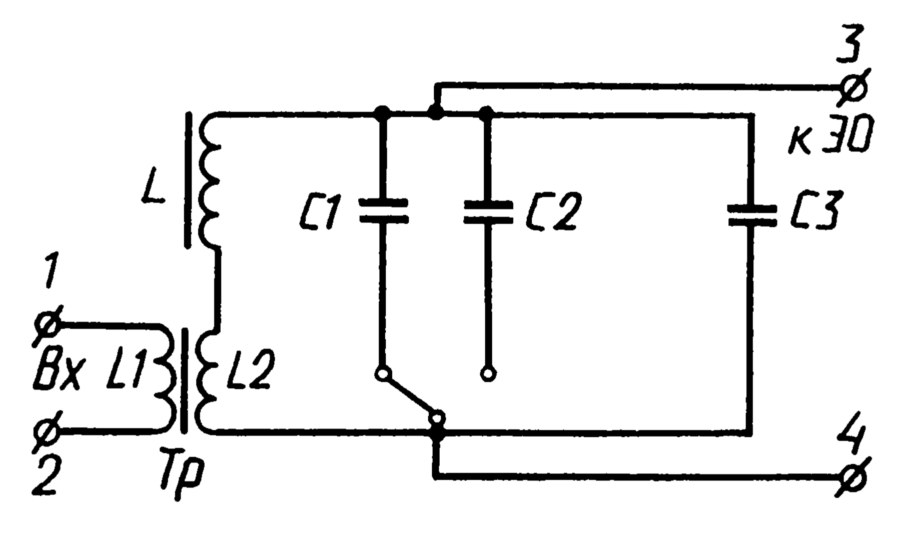


Рис. 226

Размер воздушного зазора в сердечнике должен быть порядка 0,6—0,8 мм. Зазор делается во внутреннем стержне сердечника.

Этот прибор, а также описанные выше приборы для получения П-образных и пилообразных сигналов, а также однополупериодный выпрямитель монтируются на вертикальных панелях.

10. Пружинный маятник с принадлежностями. Как видно из рисунков 4, 11, 12 и др., этот прибор представляет собой ведерко, подвешиваемое на горизонтальных пружинах (двух, четырех или шести). В ведерко можно помещать чугунные диски массой по 200 г каждый. В двух дисках сделаны гладкие отверстия диаметром 15 мм, а в третьем — отверстие диаметром 12 мм с резьбой, в которую можно ввернуть трубку для чернил либо демпфер. Для возбуждения вынужденных колебаний в комплект входит стойка с шатуном. Детали, из которых собирается прибор, показаны на рисунке 227 (*1* — ведерко; *2* — пружины; *3* — трубка для чернил; *4* — динамический демпфер; *5* — демпфер; *6* — стойка с шатуном; *7* — грузы).

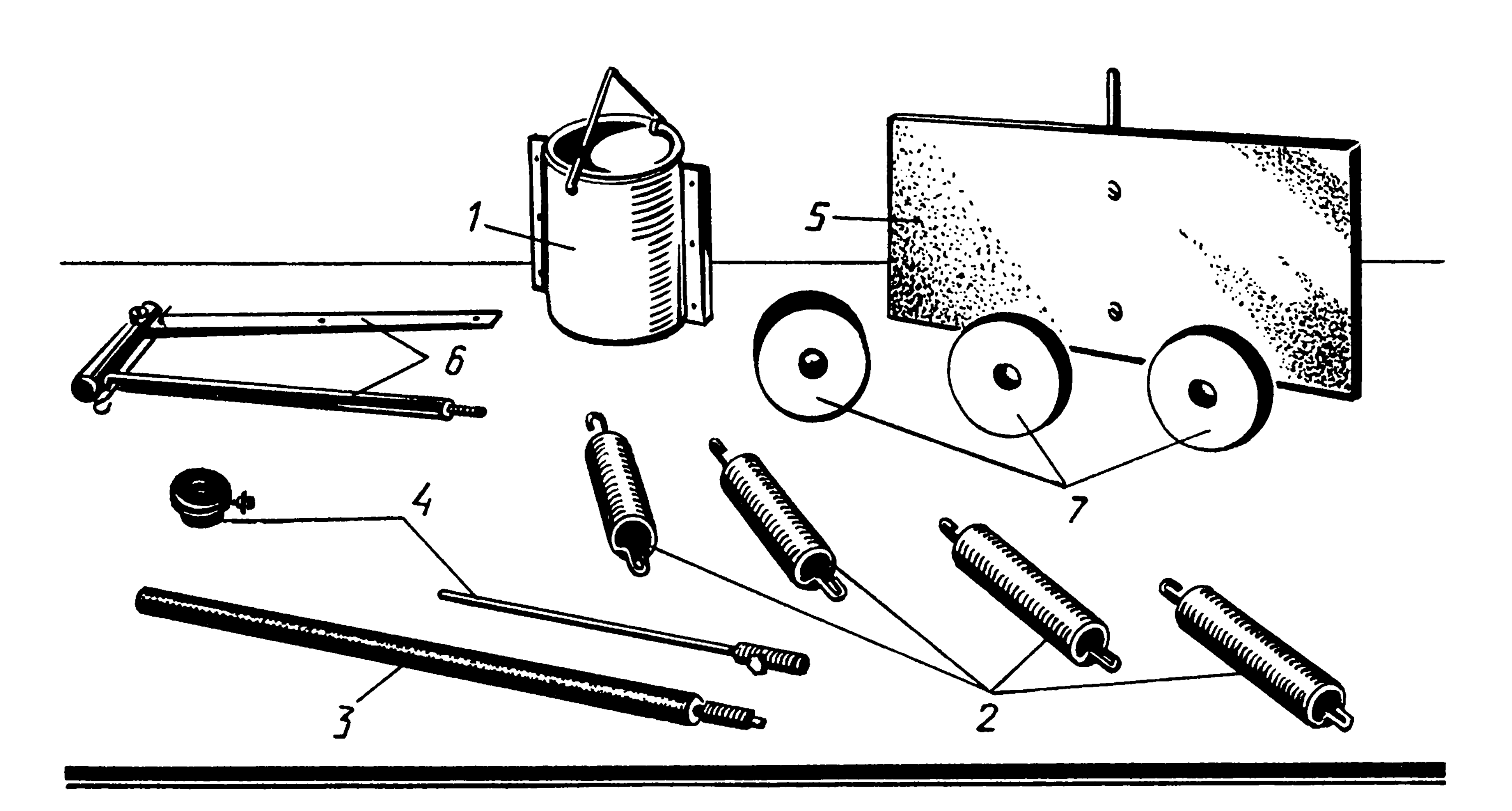


Рис. 227

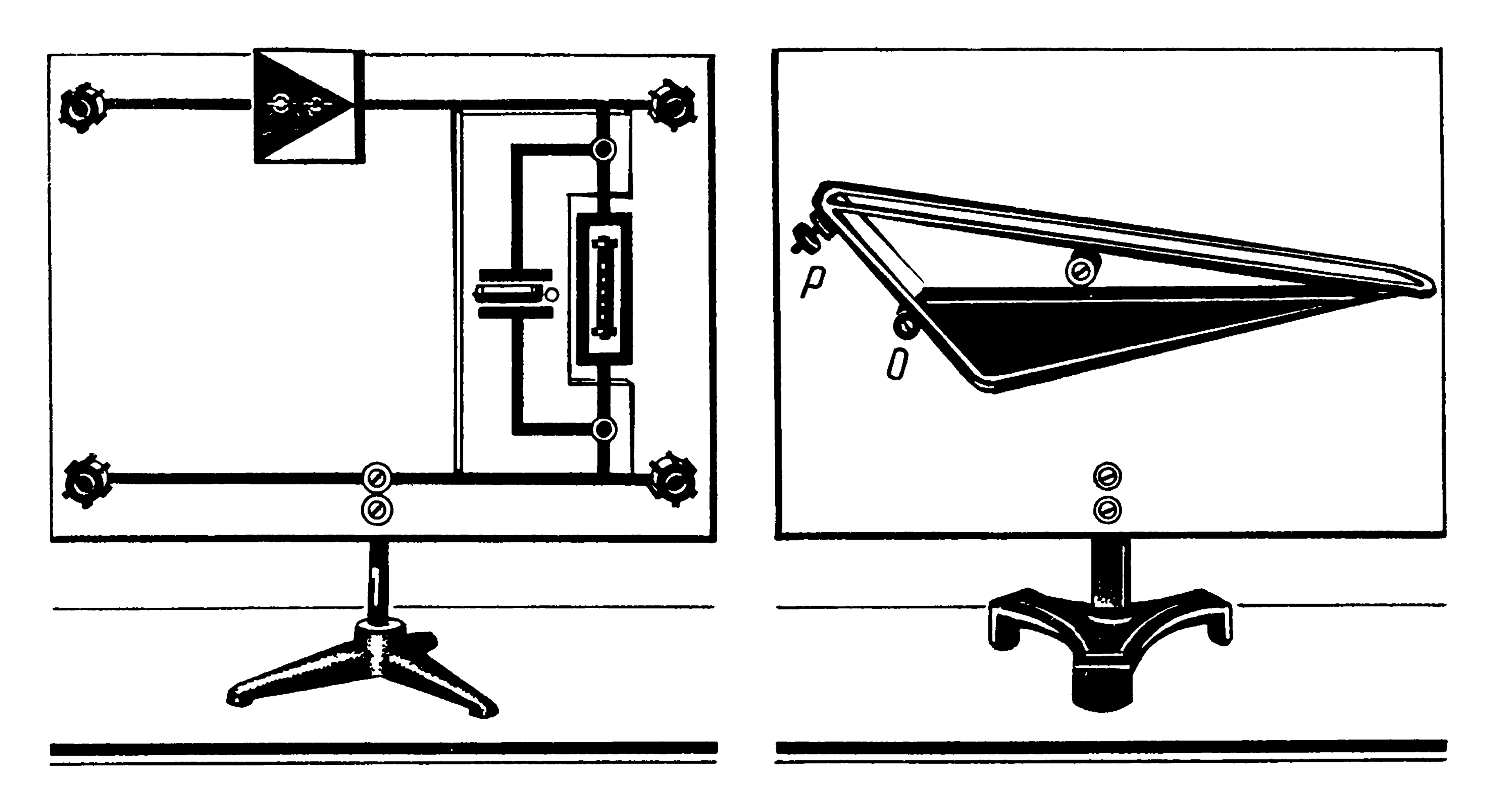


Рис. 228 Рис. 229

11. Детекторная ячейка монтируется на панели из хорошо изолирующего материала размером 250×350 мм (рис. 228). Детектор и конденсатор смонтированы на съемных колодках из органического стекла, снабженных штепсельными штырьками. Для включения этих деталей на панели должны быть установлены соответствующие гнезда. В качестве детектора можно практически использовать любой высокочастотный диод. Конденсатор должен иметь емкость 100—200 пФ, а сопротивление резистора берется равным 150—300 кОм.

12. Модель генератора релаксационных колебаний. Описываемая здесь жидкостная модель генератора релаксационных колебаний (рис. 229) отличается небольшой вместимостью опрокидывающегося сосуда вследствие малой его ширины (порядка 10 мм). Предусмотрена возможность регулирования частоты колебаний путем передвижения упора *O* по вертикали или изменения длины плеча у противовеса *P*.

Хорошая видимость прибора достигнута за счет больших его размеров и применения подкрашенной жидкости и белого экрана.

13. Конденсатор переменной электроемкости. Для демонстрации параметрического усиления электромагнитных колебаний необходим конденсатор, электрическая емкость которого периодически изменяется. Самый простой способ получения такого конденсатора (пригодного лишь для очень низких частот) состоит в том, чтобы ось демонстрационного конденсатора соединить со штоком вибратора (рис. 230). В этом случае электроемкость будет изменяться по закону «очень тупой пилы».

Для получения больших частот изменения электроемкости надо на хорошо изолирующем основании собрать статор из 10—15 пластин, размеры и форма которых приведены на рисунке 231, *а*.

Пластины можно вырезать из алюминия или из пластика, покрытого фольгой. Боковые стенки статора (рис. 231, *в*) необходимо изготовить из хорошо изолирующего материала. Они служат основанием прибора. Все пластины статора собираются в пакет на 4 винтах. Расстояние между пластинами чуть больше толщины пластин ротора. Все пластины статора через крепежные винты и шайбы соединяются между собой электрически и соединены с клеммой на боковой стенке.

Форма и размеры пластин ротора показаны на рисунке 231, *б*. Число пластин ротора равно числу пластин статора минус одна. Пластины лучше всего изготовить из пластика, покрытого фольгой. Фольгу с половины каждой пластины надо снять.

Пластины ротора собираются на оси так, чтобы при вращении ротора они не задевали пластин статора, но были бы к ним расположены достаточно близко. Все пластины через ось соединены между собой электрически, и ось соединена с клеммой на боковой стенке прибора, которая тщательно изолирована от статора.

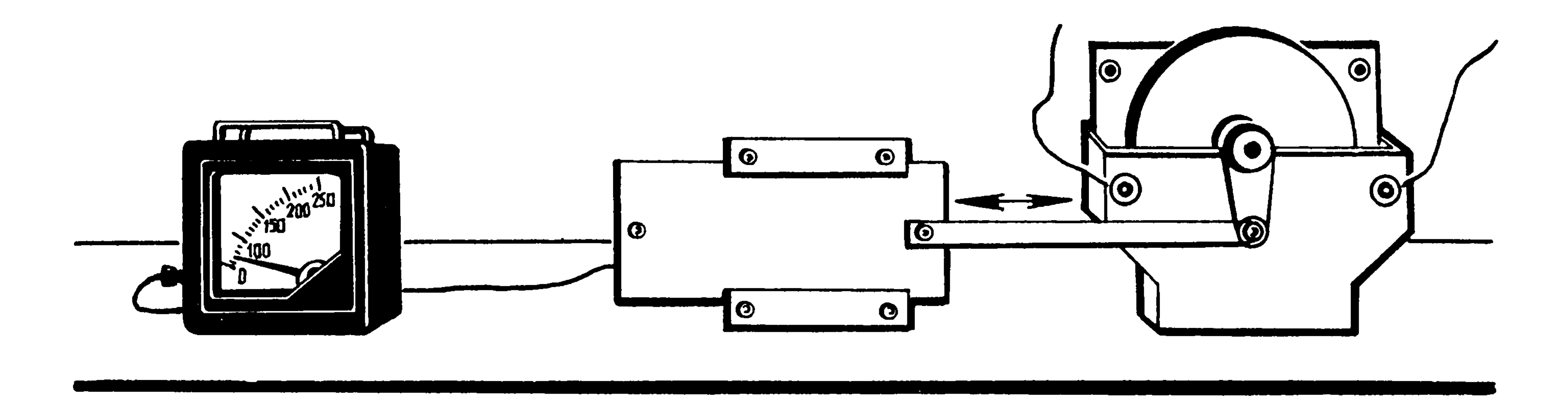


Рис. 230

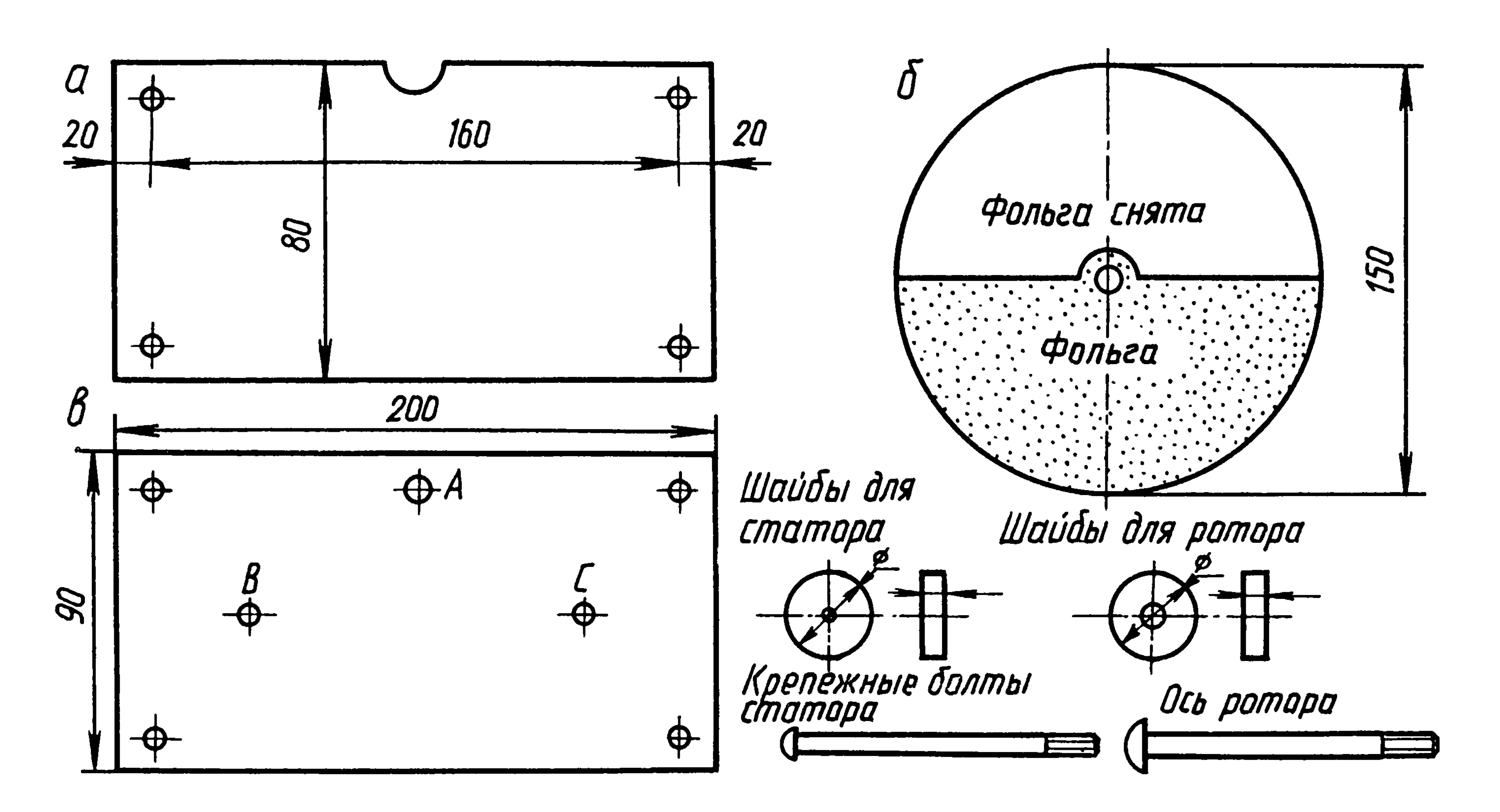


Рис. 231

После того как конденсатор будет собран, на его ось надо надеть шкив, необходимый для приведения ротора во вращение от универсального двигателя.

14. Микрофон с узкой диаграммой направленности. Качество многих демонстрационных опытов по акустике зависит от диаграммы направленности микрофона. Микрофон с узкой диаграммой направленности можно изготовить из микрофонного капсюля ДЭМШ.

Капсюль ДЭМШ с помощью резиновых растяжек подвешивают внутри неглубокого металлического стакана *1* (рис. 232), внутренние стенки которого для уменьшения отражения волн покрыты ватой *2*. К стакану привертывают металлическую трубку *3* с узким каналом.

15. Крутильный маятник собирается на демонстрационном штативе (рис. 233). Он представляет собой горизонтальное коромысло с двумя грузами на концах, закрепленное посредине вертикально натянутой стальной струны. Сверху струна закрепляется в колке от музыкального инструмента (он крепится к кольцу или лапке штатива). Нижний конец струны крепится к основанию штатива. Для этого в лапке основания штатива сверлят отверстие диаметром 3—4 мм, в которое вставляют стержень с головкой (можно взять винт от клеммы).

Коромысло маятника состоит из двух кусков стальной проволоки диаметром 2 мм и длиной по 200 мм каждая, которые заканчиваются резьбой и ввинчиваются в алюминиевый (или стальной) стержень высотой до 60 мм. Сквозь стержень просверлено отверстие для струны. Стержень на струне закрепляется концами ввертываемых коромысел.

16. Тела для демонстрационных маятников. Обычно для демонстрационных маятников используются шарики небольших размеров, подвешиваемые на коротких нитях к лапкам штативов. Такие маятники плохо смотрятся, и опыты с ними плохо запоминаются. Опыты становятся более выразительными, если взять массивные шары больших размеров и подвесить к потолочной балке. Такие массивные шары можно весьма просто изготовить из детских полых пластмассовых шаров, которые продаются в магазинах игрушек. Их наполняют песком, опилками, свинцовой дробью. К каждому шару надо приделать две петли для бифилярного подвеса.

Для изготовления петель вырезают из латуни или луженого железа (например, от консервной банки) пластинки, примерная форма которых приведена на рисунке 234. Ширина пластинок 5—8 мм, длина примерно 60 мм. В шарах по хорде большого круга острым ножом делаются прорези по ширине изготовленных пластинок. Пластинки вставляют «навстречу» друг другу, и их свободные концы спаивают. После этого выступающие части отгибают по направлению радиусов.

Шары имеют одинаковый объем, но различную массу. Их можно различать по цвету.

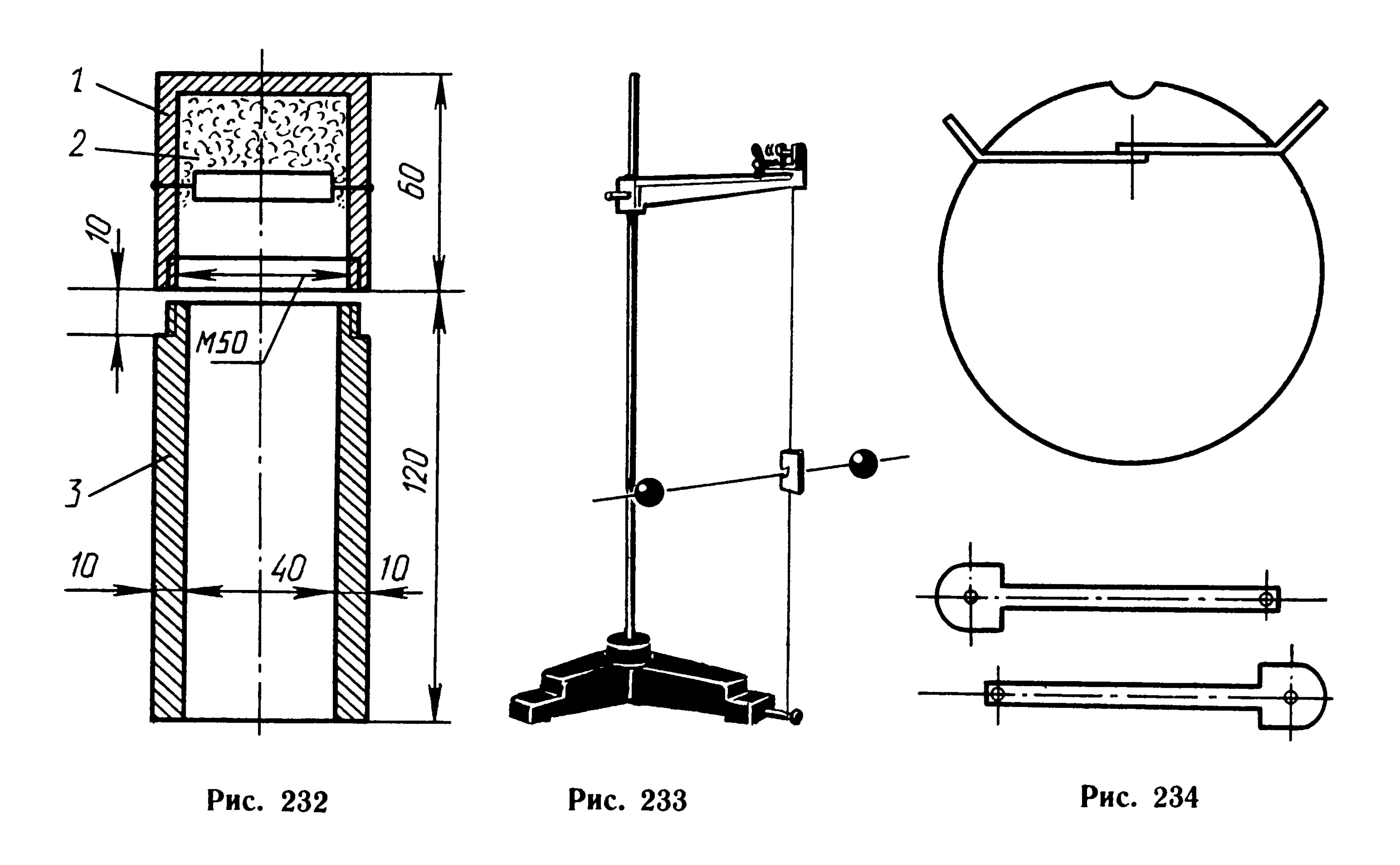


Рис. 232 Рис. 233 Рис. 234

17. Подвесы для маятников. Опыты с маятниками можно поставить быстрее, если изготовить из тонкой стальной проволоки специальные подвесы с крючками на концах (лучше всего применить рыболовные крючки, спилив у них острые края). Подвесы из стальной проволоки удобны тем, что подвешенный на ней маятник не крутится. Кроме того, такие подвесы удобно хранить свернутыми в кольца большого диаметра. Место соединения крючка с проволокой следует пропаять: в этом случае крючок и проволока монолитны, и подвешенный шар не будет совершать никаких дополнительных движений.

Желательно иметь следующий набор подвесов: 4 подвеса, длина которых на 20 см меньше расстояния от потолка до поверхности демонстрационного стола; 2 подвеса вдвое более коротких и 2 подвеса, имеющих в 3 раза меньшую длину, чем первые четыре. Для хранения подвесов очень удобен детский пластмассовый обруч, в котором надо сделать отверстия для крючков. Обруч вешается на гвоздь.

18. Лентопротяжный механизм предназначен для равномерного движения бумажной ленты в опытах, связанных с записью осциллограммы колебаний. Механизм состоит из направляющих салазок и электрического двигателя с постоянным числом оборотов. На вал двигателя надевается приемный барабан для намотки на него тонкой лески, которая прикрепляется к листу бумаги, вставленному в направляющие салазки.

Направляющие салазки изготовлены из гладкой доски шириной 350 мм и длиной 800 мм, к краям которой шурупами привернуты 2 алюминиевых уголка так, что между верхней поверхностью доски и уголком остается промежуток 1 мм. Длина уголков 860 мм. На

выступающих из-за доски концах уголков установлены легковращающиеся валики, облегчающие движение бумаги по направляющим салазкам. Для установки на демонстрационном столе направляющие салазки имеют с тыльной стороны откидывающийся упор из толстой фанеры. Угол наклона направляющих салазок примерно 30°.

19. Призма для сантиметровых волн. Прилагаемая к комплекту СВЧ треугольная призма изготовлена из вещества, показатель преломления которого больше единицы. Интересно было бы иметь призму из материала с показателем преломления, меньшим единицы. Но такого вещества в природе нет. Однако такую призму можно изготовить из металлических листов (металлопластинчатая призма). Для этого из тонких листов алюминия или латуни надо вырезать 8 равносторонних треугольников со стороной примерно 200—250 мм (рис. 235). Вырезанные пластины с помощью 3 болтов и прокладок соединяются так, чтобы расстояние между ними было 20 мм.

Так как принцип работы металлопластинчатых линз в школе не изучается, то изготовленную призму необходимо оклеить толстой бумагой или непрозрачной пластмассовой лентой. Учащимся же следует лишь показать свойство призмы: отклонять падающие на нее лучи не к основанию, а к вершине.

20. Бипризма для сантиметровых волн. Для демонстрации интерференции электромагнитных волн сантиметрового диапазона желательно изготовить металлопластинчатую бипризму. Металлопластинчатая бипризма состоит из 2 металлопластинчатых призм, соединенных между собой вершинами (рис. 236). Каждая призма состоит из 7 пластин одинаковой длины (300 мм), но различной ширины (10, 18, 26, 34, 42, 50 и 58 мм), расположенных на рас-

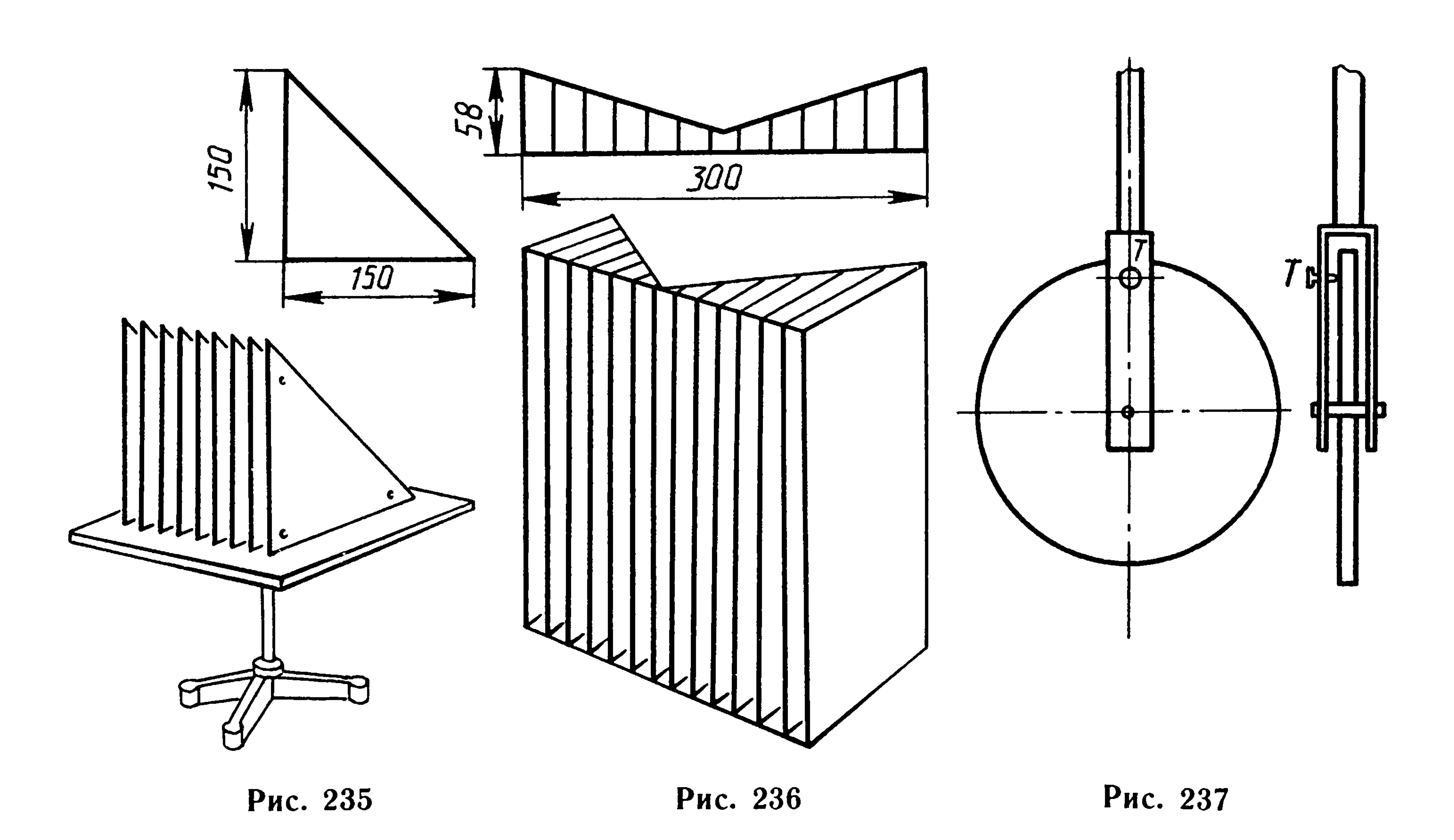


Рис. 235 Рис. 236 Рис. 237

стоянии 23 мм друг от друга. Для крепления пластин надо изготовить деревянный каркас, в верхнем и нижнем основаниях которого делают неглубокие пропилы для металлических пластин. Спереди и сзади призму оклеивают бумагой.

21. «Тонкая» пластинка для сантиметровых волн. Для демонстрации явления интерференции электромагнитных волн при отражении от «тонкой» пластинки (аналогичного интерференции световых волн, отраженных от тонкой пленки) необходимо взять 2 тонких листа текстолита и расположить параллельно друг другу на расстоянии примерно 7 мм.

22. Блок с трением (рис. 237) служит регулируемой нагрузкой при демонстрации отражения волн. В случае, когда блок неподвижно закреплен стопорным винтом, так же как и в случае, когда блок свободно качается вокруг своей оси, он почти не забирает энергии от бегущей вдоль шнура волны, и волна отражается (см. опыт 110).

Мягкий тормоз позволяет создать такое трение в блоке, при котором почти вся энергия падающей волны идет на преодоление трения. В этом случае вдоль стержня распространяется только бегущая волна (см. опыт 111).

Блок изготавливают из текстолита толщиной 5 мм. Диаметр блока 120 мм. Мягкий тормоз делают из фетра толщиной 4 мм. Тормоз насаживают на микрометрический винт (можно использовать винт от старого микрометра). Стальная обойма блока крепится к потолку.

Существенное значение имеют упругость использованного в опыте стержня и его погонная масса. Описанный выше блок хорошо работает, когда в качестве шнура использован двужильный телефонный провод в хлорвиниловой оболочке, навернутый на стержень диаметром 8 мм. Изготовленный таким образом шнур подвергают кратковременному нагреванию в пламени газовой горелки. (Делать это надо быстро, так, чтобы изоляция не оплавилась.) Длина полученной спирали около 2 м.

Мелкие усовершенствования. Описанные ниже усовершенствования существующей аппаратуры повышают ее методические качества и облегчают труд учителя по подготовке и проведению демонстрационного эксперимента.

1. «Трансформаторы на панельке» целесообразно переставить на вертикальные панельки, в основаниях которых следует просверлить отверстия диаметром 10 мм, с тем чтобы трансформаторы можно было устанавливать один над другим (см. опыты 81—84).

К трансформатору надо изготовить панельку, снабженную клеммами с одной стороны и штырьками — с другой. На отдельной панельке укрепляют конденсатор емкостью около 0,5 мкФ. Выводы от конденсатора присоединяются к 2 клеммам и 2 пластинчатым штырькам с вилками на концах (для присоединения к зажимам трансформатора).

2. Демонстрационный усилитель (Одесского завода учебного

оборудования) по своим техническим параметрам в основном удовлетворяет нуждам школьного учебного эксперимента.

Для того чтобы улучшить методическое качество демонстраций, целесообразно на лицевой стороне панели нарисовать условное изображение усилителя и установить клеммы входа и выхода сигнала.

3. **Коммутатор к электронному осциллографу** надо снабдить большой, хорошо видимой панелью, на которой следует оставить только 4 клеммы для подачи двух сигналов и 2 клеммы для снятия сигнала. Такая панель должна быть прикреплена к коммутатору винтами с тыльной стороны. В этом случае собственная панель прибора будет обращена к учителю.

4. **Приспособление для записи осциллограмм.** Для записи осциллограмм в стакане маятника и в грузах просверлены отверстия, через которые пропускается пустой стержень от шариковой ручки. Конец пишущей части стержня (с шариком) отпилен. Сам стержень вставлен в дно любого пластмассового сосуда, в который в ходе опыта наливаются чернила.

§ 17. Оборудование к теме «Переменный ток»

Демонстрационные амперметр, вольтметр и ваттметр для измерений в цепях переменного тока

При изучении темы «Переменный ток» необходимо измерять силу тока, напряжение и мощность в цепях переменного тока.

Выпускаемые для школ демонстрационные амперметр, вольтметр магнитоэлектрической системы (с выпрямителем) малопригодны для этой цели, а демонстрационные ваттметры в цепях переменного тока обладают малой точностью.

Однако выпускаемые промышленностью амперметры и вольтметры типа Д-170 и ваттметры типа Д-174 без большого труда можно переделать в демонстрационные приборы. Это приборы ферродинамической системы. Они ударопрочны и предназначены для измерений в цепях переменного тока с частотой 50 Гц. Благодаря специальной форме магнитопровода шкала в этих приборах «растянута» на 270 мм, а угол максимального отклонения стрелки равен 230°. Рабочая часть шкалы амперметра и вольтметра лежит в пределах от 20 до 100%, а у ваттметра составляет 100% от ее длины, рабочее положение приборов вертикальное. Класс точности — 2,5, что вполне достаточно для демонстрационных приборов.

Переделка приборов заключается в изготовлении новых шкал и корпусов, а также удлинении стрелки, что в свою очередь требует утяжеления противовесов.

Наиболее удобны для переделки амперметр на 5 А и вольтметр на 150 В, при этом электрическая схема их не изменяется.

Несколько сложнее переделать ваттметр. Ваттметр Д-174 предназначен для измерения активной мощности в цепи трехфазного тока и представляет собой два отдельных однофазных ваттметра, подвижные системы которых находятся на одной оси и их вращающие моменты в процессе измерений складываются.

Для переделки следует взять ваттметр, рассчитанный на максимальную силу тока 5 А и напряжение 127 В (максимальная мощность 1 000 Вт). Токовые обмотки ваттметра надо соединить последовательно, а обмотки напряжения — параллельно. При таком соединении обмоток чувствительность прибора повышается вдвое и стрелка отклоняется на максимальное значение при мощности 500 Вт.

Наиболее сложная и тонкая часть работы по переделке приборов заключается в изготовлении стрелок и противовесов. Стрелки лучше всего изготовить из алюминиевой фольги. Для этого фольгу наматывают на спицу, диаметр которой равен диаметру стрелки прибора. Сняв получившуюся трубку со спицы, расплющивают (для лучшей видимости) один из ее концов. Обрезав расплющенный конец так, чтобы длина стрелки соответствовала шкале прибора, другой ее конец надевают на предварительно смоченный клеем конец стержня, на котором до этого была укреплена стрелка прибора. Делать это надо очень осторожно. Для утяжеления противовеса удобно намотать тонкую медную проволоку.

Измерительный механизм прибора надо поместить в новый, заново сделанный корпус прибора размером $320 \times 270 \times 10$ мм. Диаметр шкал в этом случае будет 250 мм, а длина стрелки 250 мм, что обеспечивает очень хорошую видимость с любого места аудитории.

Шкалы амперметра и ваттметра надо разделить на 5 крупных делений, каждое из которых надо разделить на 10 делений. Такие шкалы позволяют производить измерения силы тока до 0,1 А, а мощность — до 10 Вт, что вполне удовлетворяет потребности всех демонстрационных опытов.

Шкалу вольтметра целесообразно разделить на 15 крупных делений, каждое из которых надо разделить пополам. В этом случае цена деления прибора 5 В. Шкалы приборов лучше сделать черными: белые деления и белая стрелка видны лучше, чем черная стрелка и черные деления на белой шкале.

§ 18. Оборудование к теме «Электромагнитные волны»

Для постановки ряда опытов, в ходе которых демонстрируются физические основы современной радиотехники, необходим маломощный генератор дециметровых волн, работающий в радиолюбительском диапазоне частот (430—440 МГц). В специальной литературе для радиолюбителей описано несколько исключительно удачных конструкций генераторов, повторение которых доступно учащимся.

1. Ламповый генератор дециметровых волн. Ниже описана несколько измененная конструкция УКВ генератора дециметровых волн, работающего в диапазоне 430—440 МГц ($\lambda \approx 68$ см), впервые предложенная ташкентским радиолюбителем А. Колесниковым. В конструкцию были внесены несущественные изменения, позволившие приспособить генератор для постановки демонстрационных опытов.

Генератор (рис. 238, *а*) собран по двухтактной схеме на лампе 6Н3П с заземленной сеткой (рис. 238, *б*). Одной из особенностей этой схемы является отсутствие явно выраженной цепи обратной связи, которая носит емкостный характер (роль конденсатора в данном случае выполняет анод или катод).

В качестве колебательного контура использован четвертьволновый отрезок короткозамкнутой двухпроводной линии, изготовленный из медной полоски шириной 13 мм и длиной 160 мм (рис. 239, *а*). Толщина полоски некритична и может быть в пределах от 0,1 до 1 мм. Изготовленный таким образом отрезок двухпроводной линии является колебательной системой с высокой добротностью.

Генератор смонтирован на Г-образном основании. Причем сам генератор собран на верхней полочке основания (рис. 239, *б*) вокруг ламповой керамической панельки, а на вертикальной части расположены только клеммы питания (рис. 239, *в*).

Для уменьшения индуктивности в цепи общего электрода сетки заземлены через конденсаторы *C1* и *C2*, выполненные в виде латунных пластин площадью примерно 3 см^2, прижатых через слюдяные прокладки толщиной 0,1 мм или меньше непосредственно к шасси генератора (рис. 239, *в*).

Чтобы колебания высокой частоты не замыкались через конденсатор, образованный катодом — подогревателем, в цепь накала введены дроссели *Др1* и *Др2*.

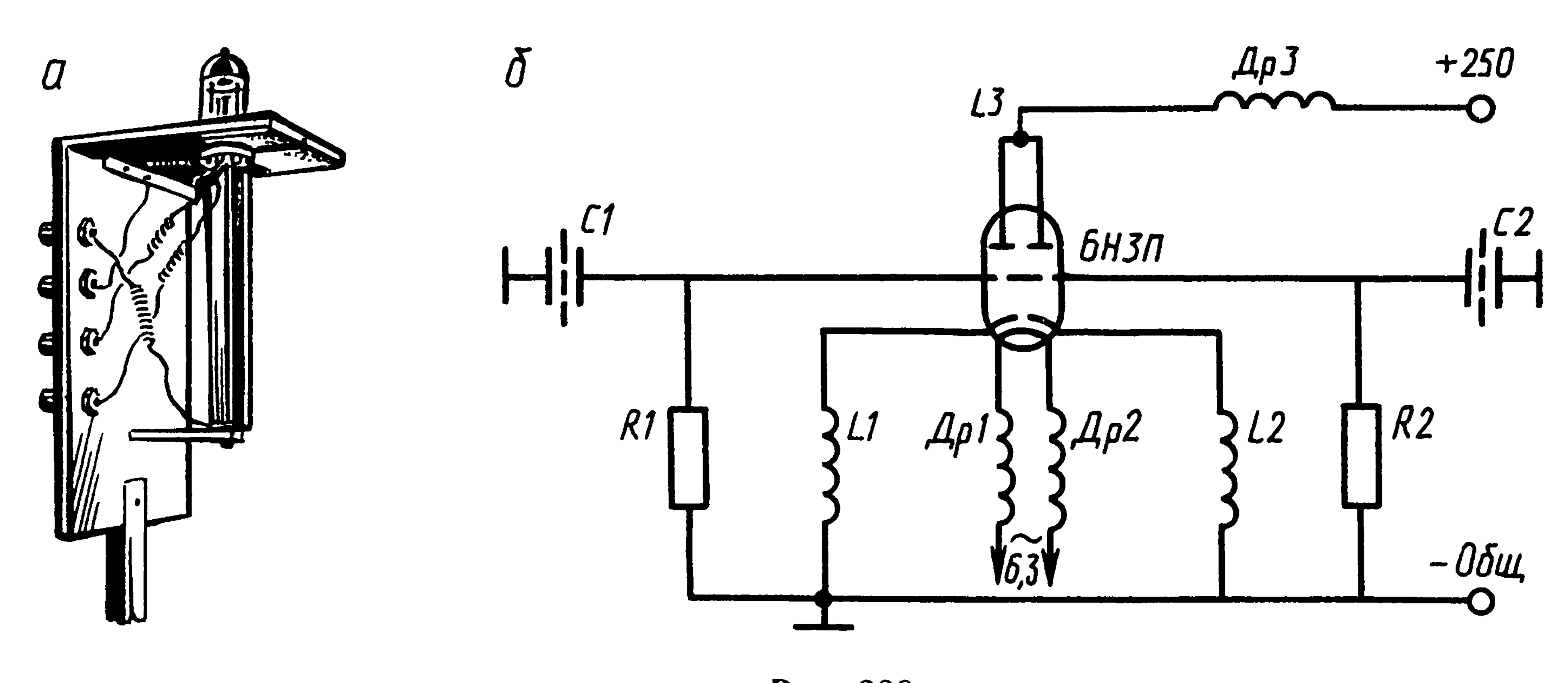


Рис. 238

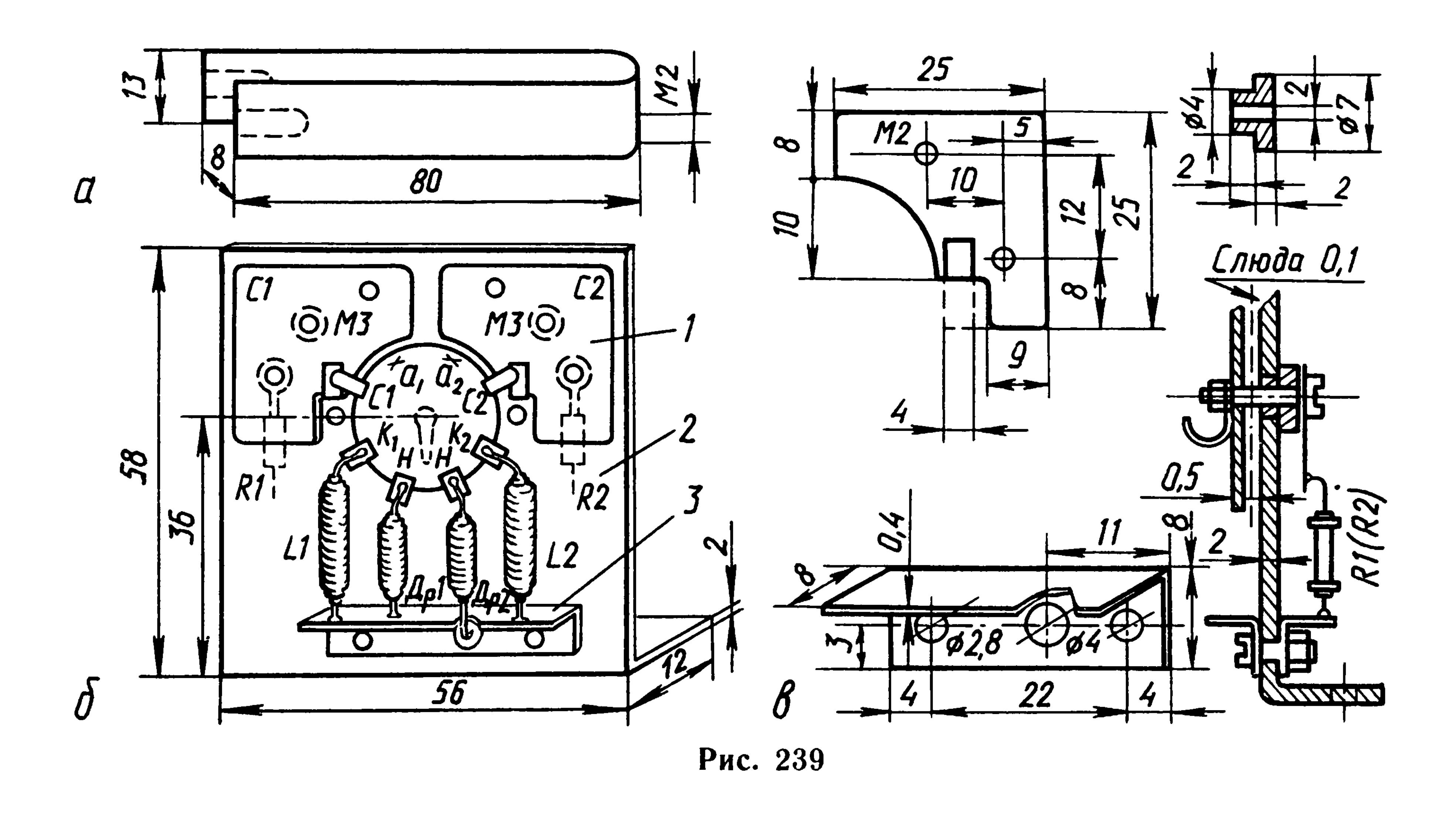


Рис. 239

В таблице приведены данные дросселей, индуктивностей и сопротивлений.

Таблица

Детали	Данные
Дроссели в цепи накала (*Др1, Др2*)	Каркас диаметром 3 мм; провод — 0,2 м; число витков — 20
Дроссель в цепи анода (*Др3*)	Каркас диаметром 3 мм; провод — 0,1 мм; число витков — 40
Индуктивности в цепи катодов	Бескаркасные. Внутренний диаметр — 4 мм; провод — 0,6—0,8 мм; длина намотки — 10 мм
Сопротивления	3,7—5,4 кОм, 0,25 Вт

Для отвода энергии используется штырьевая антенна, располагаемая параллельно отрезку линии. Длина антенны — 320 мм (на 20 мм меньше половины длины волны). Антенну устанавливают на шасси генератора с помощью пружинящего зажима из плексигласа. Мощность излучения 0,1—0,2 Вт.

Генератор в случае его правильного изготовления начинает работать без какой-либо настройки.

В качестве приемника используется диполь с лампочкой от карманного фонаря ЛН 1 В, 0,068 А или ЛН 2,5 В, 0,068 А или с высокочастотным кремниевым детектором типа ДК-С7М и гальванометром. Лампочка светится на расстоянии до 1,5 м, а стрелка гальванометра, подключенного параллельно детектору, отклоняется

в пределах видимости всей аудитории. Дипольные приемники и другие вспомогательные принадлежности к генератору описаны и изображены на рисунках к соответствующим демонстрациям.

В условиях школьного физического кабинета длину волны генератора можно с точностью до $\pm0{,}5$ см измерить с помощью длинной линии. Длина волны генератора в основном определяется длиной отрезка линии, подключенной к анодам лампы. Обычно длина волны больше $4l$. Поэтому длину четвертьволнового отрезка линии надо делать точно по размерам, указанным на рисунке 239, *а*.

2. Транзисторный генератор дециметровых волн[1]. Как и ламповый, транзисторный генератор работает в разрешенном радиолюбительском диапазоне (430...440 МГц). Длина волны описанного ниже генератора — 68 см. Генератор собран по однотактной схеме с емкостной обратной связью на транзисторе 2Т911Б, но годится любой другой транзистор Т911 (например, КТ911).

Колебательный контур характеризуется индуктивностью отрезка несимметричной линии $L_к$, внутренней межэлектродной электроемкостью транзистора и электроемкостью монтажных элементов (рис. 240).

Обратная связь осуществляется через емкостной делитель контурного напряжения, учитывающий межэлектродную емкость транзистора и электроемкость монтажных деталей.

Контур подключается к транзистору тремя точками: началом и концом несимметричного отрезка линии и средней точкой делителя напряжения. Поэтому такую схему автогенератора называют трехточечной.

Один конец несимметричной линии (отрезок медной или латунной трубки диаметром 5 мм и длиной 55 мм) припаян к коллектор-

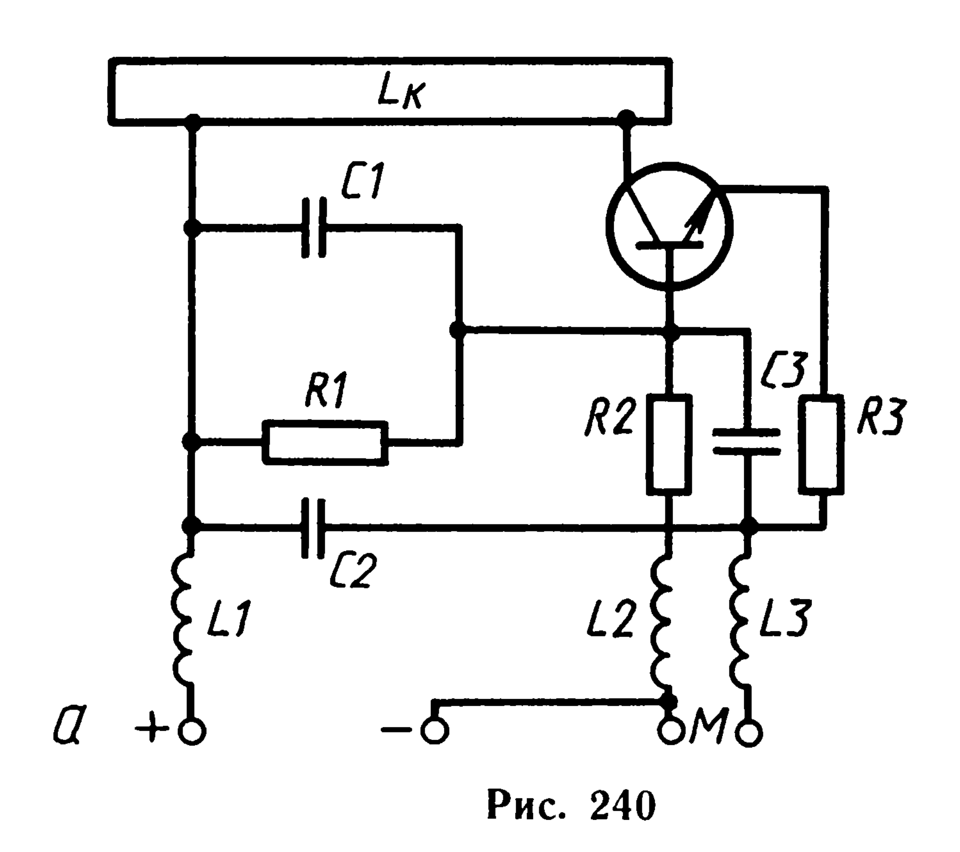


Рис. 240

[1] Конструкция генератора впервые была описана в книге: Б. Ю. Миргородский, В. К. Шабаль. Демонстрационный эксперимент по физике. Колебания и волны.— Киев: Радяньска школа, 1985.

ному выводу транзистора, а второй — к медному штырьку, продетому сквозь плату, а через него — припаянному к фольге.

При работе генератора транзистор нагревается. Для отвода от него тепла необходим небольшой радиатор, который проще всего сделать в виде двух металлических дисков диаметром 20—25 мм, толщиной примерно 1 мм. В центре диска необходимо просверлить отверстие диаметром 5 мм, через которое пропускается монтажный винт транзистора. Металлические диски располагаются с обеих сторон платы и крепятся к ней (и к транзистору) монтажным винтом.

Конденсаторы *C1* и *C2* безиндукционные, например типа КТК, КЛС, КМ. Дроссели *L1, L2* и *L3* не пропускают колебания высокой частоты в источник питания и в модулятор. Дроссели бескаркасные изготовлены из провода ПЕЛ-0,8 по 7—8 витков диаметром 5 мм.

Данные остальных деталей приведены ниже.

Конденсаторы: *C1*—200, *C2*—200, *C3*—0,1 мкФ.

Резисторы: *R1*—750, *R2*—240, *R3*—51 Ом.

Излучающая антенна изготавливается из медной (или латунной) трубки (можно из стержня) диаметром 5—6 мм и длиной 330 мм (что на 10 мм меньше половины длины волны). К середине трубки припаивается винт от клеммы, с помощью которого антенна крепится к плате генератора параллельно несимметричному отрезку линии *L1*. Значение необходимой связи антенны с генератором находят экспериментально, перемещая крепежный винт антенны в прорези платы *A*.

Для работы генератора необходим источник постоянного тока напряжением 22—25 В. Потребляемый генератором ток около 0,15 А. Для этой цели легко приспособить школьный выпрямитель ВС4-12. Но для этого параллельно выходу выпрямителя надо подключить электролитический конденсатор электроемкостью 200 мкФ (рассчитанный на рабочее напряжение 50 В). При положении переключателя напряжения «12 В» напряжение на выходе будет 28 В, а при положении переключателя «10 В» — 22 В. Сглаживающий пульсации конденсатор надо поместить внутри корпуса выпрямителя.

При правильной сборке и исправных деталях генератор обычно начинает работать без наладки. Но иногда возникает необходимость наладки. Она крайне проста: надо заменить опорный резистор *R2,* взяв резистор на несколько десятков ом больше или меньше — 240 Ом.

Приемником электромагнитных волн, излучаемых генератором, служит приемный диполь, состоящий из двух трубок длиной примерно 160 мм каждая. Концы трубок закрепляют на хорошо изолирующей пластине с ручкой (рис. 241). Между концами трубок укрепляют высокочастотный диод типа Д3, ДКИ, ДК-2В, Д403, ДКС7М (такой диод использован в комплекте приемника сантиметровых волн, выпускаемого Главучтехпромом). Индикатором в этом случае служит гальванометр.

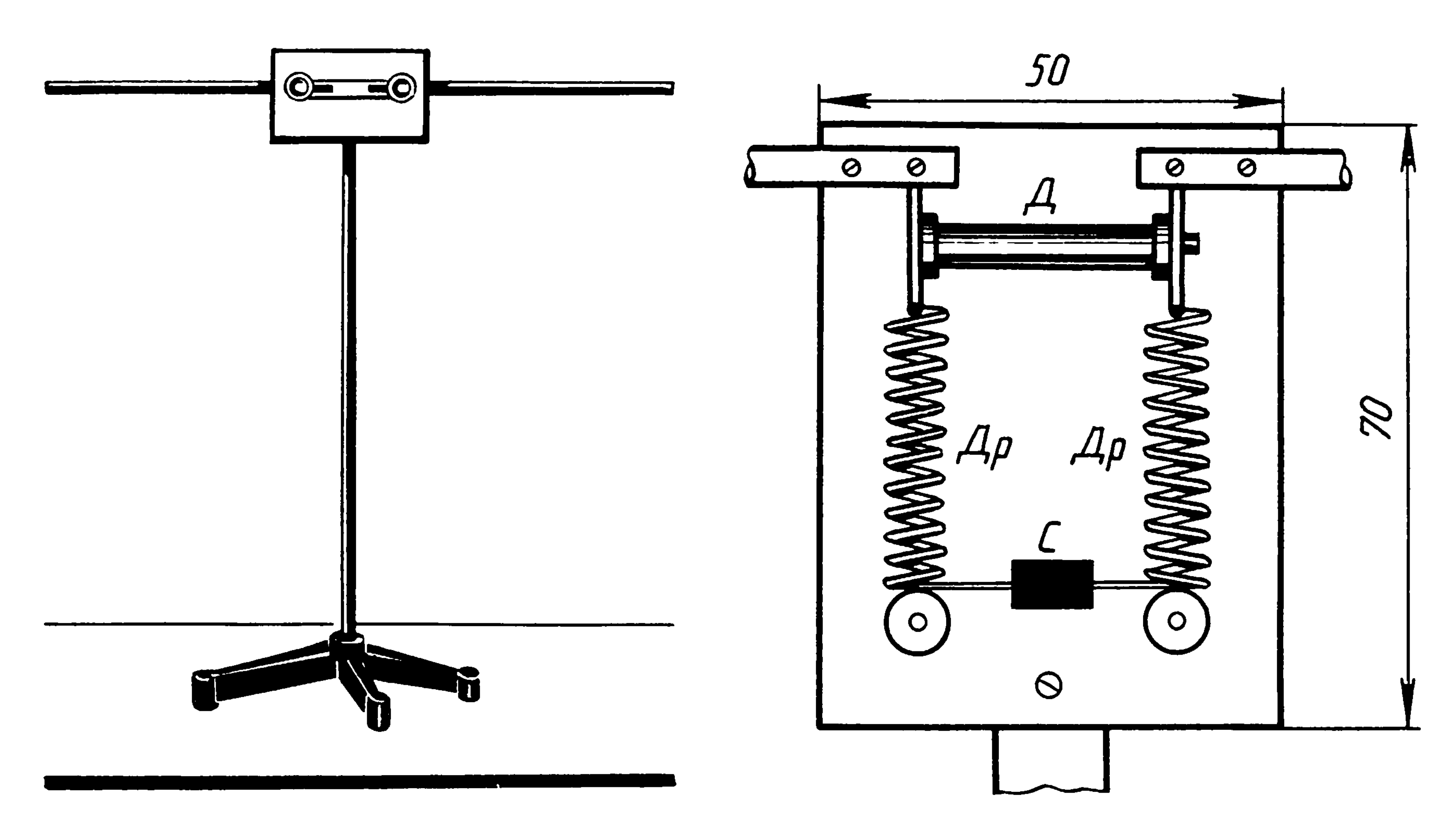


Рис. 241

§ 19. Усовершенствование приборов по оптике

Используемая в настоящее время для постановки большого числа опытов универсальная оптическая скамья не удовлетворяет многим потребностям физического эксперимента.

Прежде всего надо отметить крайне низкое качество осветителя. Кинопроекционная лампа старой конструкции (220 В, 300 Вт) не обеспечивает даже минимально необходимой освещенности в большинстве опытов. В спектре этой лампы нет ультрафиолетовой составляющей, что необходимо для ряда демонстраций. Прилагаемая к осветителю угольная дуга не имеет механизма для поддержания необходимого расстояния между углями и работает очень плохо. Специальные источники ультрафиолетового излучения в школах, как правило, отсутствуют.

Проблему можно решить двояко. Можно в осветитель поставить современную мощную металлогалогенную лампу и установить в нем вентилятор. Но этот путь довольно сложен. Проще заменить осветитель диапроектором «Свитязь», получившим в последнее время широкое распространение в школах. Источником света в этом диапроекторе является галогенная лампа КГМ 24—150, обладающая световым потоком не менее 350 лм. Нить накала этой лампы имеет значительно меньшие размеры по сравнению с нитью кинопроекционной лампы, т. е. КГМ 24—150 более удовлетворяет требованиям «точечного источника», что весьма важно для получения четких интерференционных картин. Диапроектор имеет принудительную вентиляцию; поэтому включение его возможно на продолжительное время, что также важно при проведении опыта.

Существенно важно, что нить накала лампы КГМ 24—150 имеет высокую температуру, а кварцевая колба пропускает ультрафиолетовое излучение.

Для установки диапроектора на оптическую скамью нужно изготовить площадку из любого материала (гетинакса, текстолита, дюралюминия и т. д.) толщиной 8—10 мм, как показано на рисунке 242. На площадке сверлятся отверстия *1* и *2* диаметром 5,5 мм для закрепления диапроектора и отверстия *3* с резьбой М10 для стоек. С их помощью площадка с проектором крепится на рейтерах скамьи. В корпусе проектора на месте задних ножек сверлятся два отверстия и нарезается резьба М5. Передняя ножка проектора вывинчивается из корпуса. Важным элементом многих оптических схем по интерференции света является диафрагма — раздвижная щель. Однако раздвижная щель (рис. 243, *а*) из набора оптической скамьи ФОС также невысокого качества: ножи *4* находятся не в одной плоскости, подвижные соединения *3* и *8* изготовлены с большим люфтом. С целью ликвидации этих недостатков необходимо аккуратно разобрать щель, раму *7* выправить таким образом, чтобы ножи оказались в одной плоскости, выточить новые оси *8*.

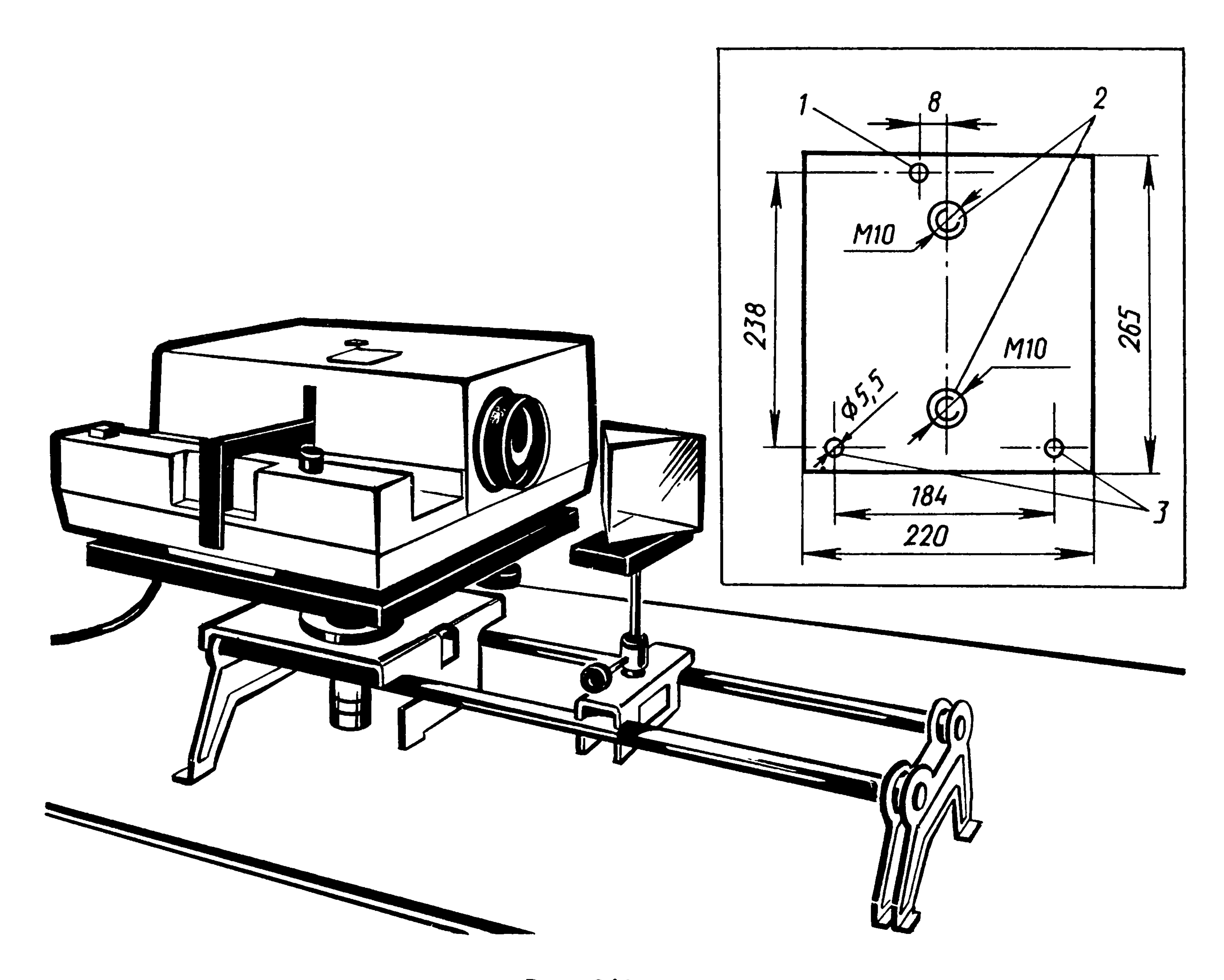


Рис. 242

Ножи требуют тщательной заточки и доводки. Заточка осуществляется на станке. Качество окончательной заточки проверяется под микроскопом. Ширина щели *5* регулируется с помощью обычного винта, а не микрометрического. Даже при применении обычных винтов в этой конструкции можно достигнуть плавного и медленного перемещения ножей. При вертикальном перемещении регулировочного винта ножи получают возможность перемещаться в горизонтальном направлении.

Двойной щели Юнга в комплекте оптической скамьи и в наборе по интерференции и дифракции нет. Ее можно изготовить из раздвижной щели, воспользовавшись тем, что ножи перемещаются симметрично относительно некоторой нейтральной линии *О — О*. Основание щели *2*, винты крепления ножей *6* к раме и возвратная пружина *9* остаются без изменений. По линии *О — О* натягивается тонкая проволока диаметром 0,05—0,1 мм. Проволока припаивается к специально изготовленным из латуни уголкам *2* (рис. 243, *б*), которые крепятся к основанию щели с помощью винта *1*. На уголке сделан паз шириной 2 мм, служащий для натяжения проволоки. Уголки по высоте должны быть установлены таким образом, чтобы проволока находилась в одной плоскости с ножами. Это достигается притиркой уголков на куске стекла с мелким абразивом. Притирают ту сторону, которая прикладывается к основанию щели. Работу можно считать законченной, если ножи и проволока видны под микроскопом одинаково резко.

Вместо отсутствующего зеркала Ллойда можно использовать поворотное зеркало от универсальной проекционной скамьи ФОС. Зеркало *1* при помощи двух винтов с заточенными под конус концами устанавливается в скобе *2* (рис. 244). Скоба крепится к

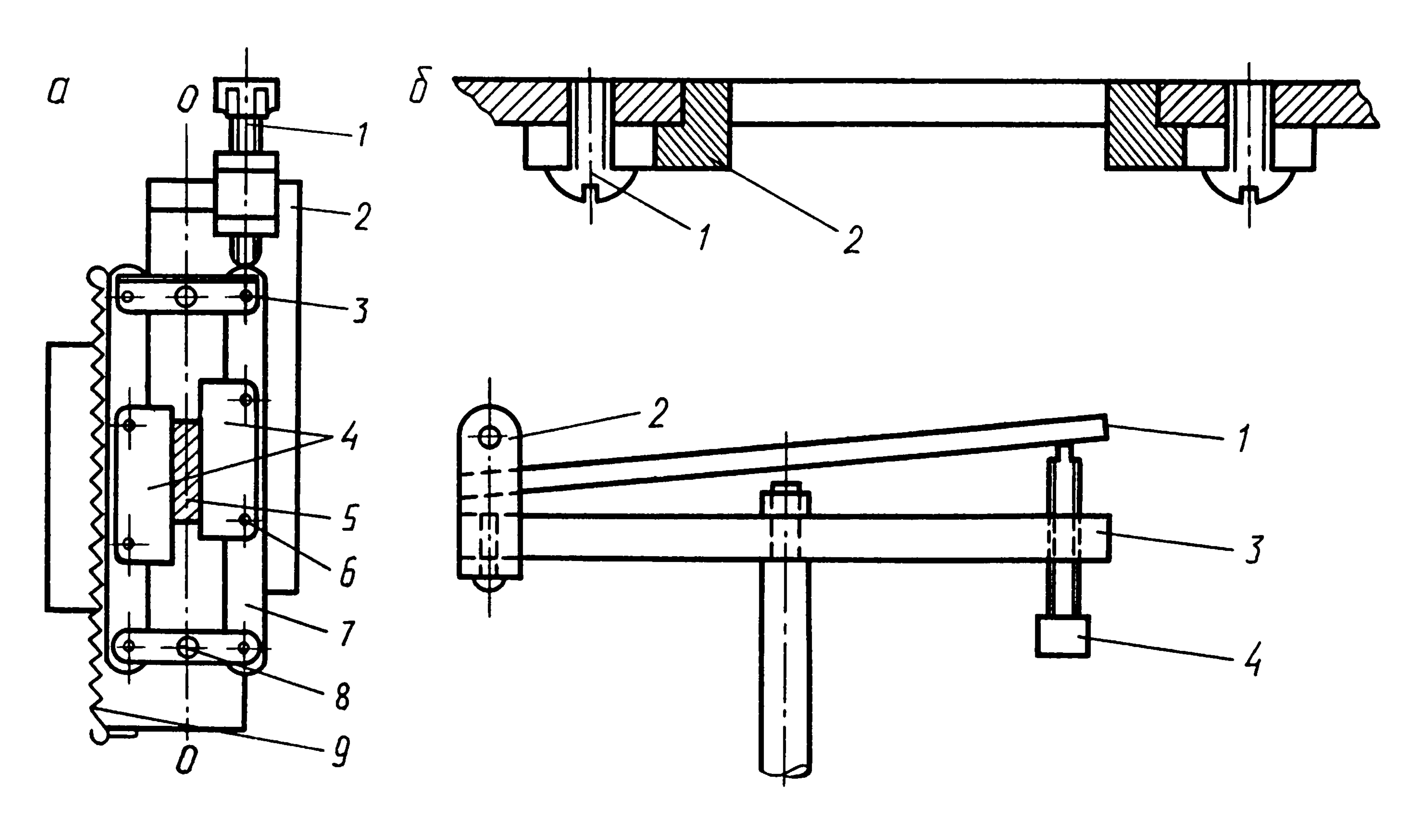


Рис. 243

Рис. 244

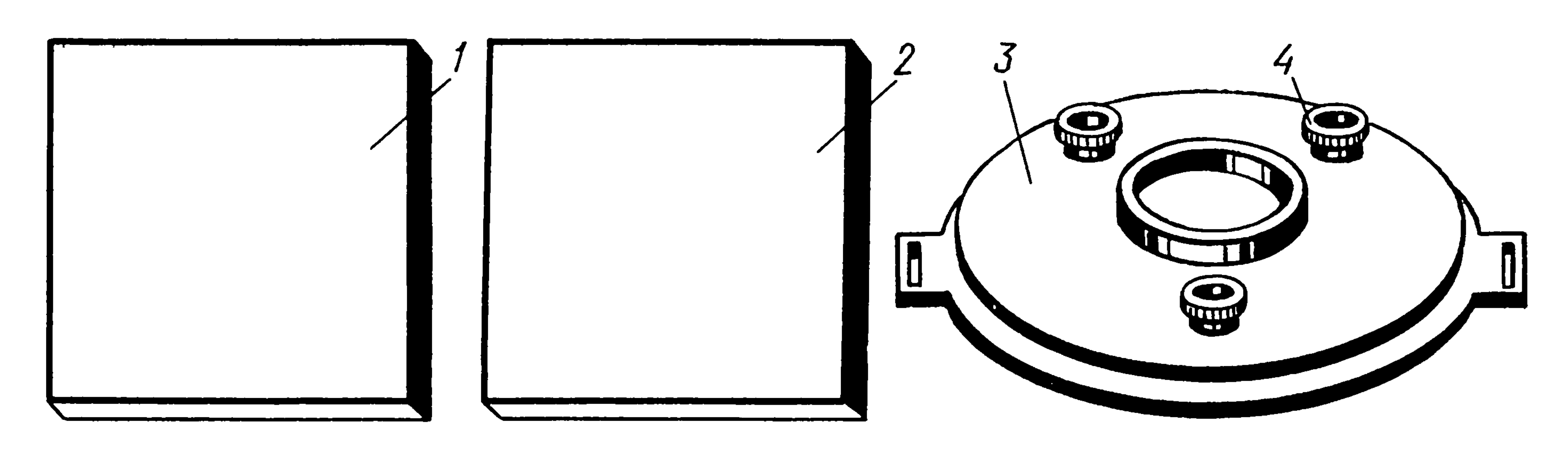


Рис. 245

специальному столику *3* при помощи винтов. Столик имеет два отверстия: одно диаметром 6 мм предназначено для установки столика на рейтере скамьи; другое с резьбой М4 — для регулировочного винта *4*.

Прибор для демонстрации интерференции света в тонком воздушном слое (рис. 245) собирается на базе оправы прибора «Кольца Ньютона». Из зеркального стекла вырезаются две пластины *1* и *2* размером 3,5×3,5 см. Готовые пластины прикладывают друг к другу и устанавливают в оправу *3*. При этом между пластинами образуется тонкий воздушный слой. Прижимая один край пластины *1* с помощью зажимного винта *4*, воздушному слою придают клиновидную форму. Если направить на поверхность стеклянной пластины под некоторым углом световой пучок, в тонком воздушном слое между пластинами возникнет интерференция света. Интерференционная картина представляет при этом параллельно чередующиеся цветные полосы. Если вместо пластины *1* использовать простое стекло, то из-за неровности поверхности параллельность цветных полос нарушится.

§ 20. Оборудование для демонстрации опытов по атомной и ядерной физике

Оборудование промышленного изготовления

Предприятия Главучтехпрома выпускают для школ всего два прибора по ядерной физике, применяемые в постановке учебного демонстрационного эксперимента: индикатор ионизирующих частиц (ИЧД-2), оснащенный газоразрядной трубкой Гейгера — Мюллера СБМ-20 (рис. 246), и камеру для наблюдения треков альфа-частиц (камеру Вильсона). В предыдущие годы выпускались индикаторы ионизирующих частиц ИЧД (рис. 247) и ИД-1 (его электронная схема показана на рисунке 248) с применением в качестве чувствительного элемента одной из газоразрядных счетных трубок СТС-5, СТС-6 или СТС-8. Эти индикаторы во множестве еще сохранились в кабинетах физики. Указанные газоразрядные трубки просты

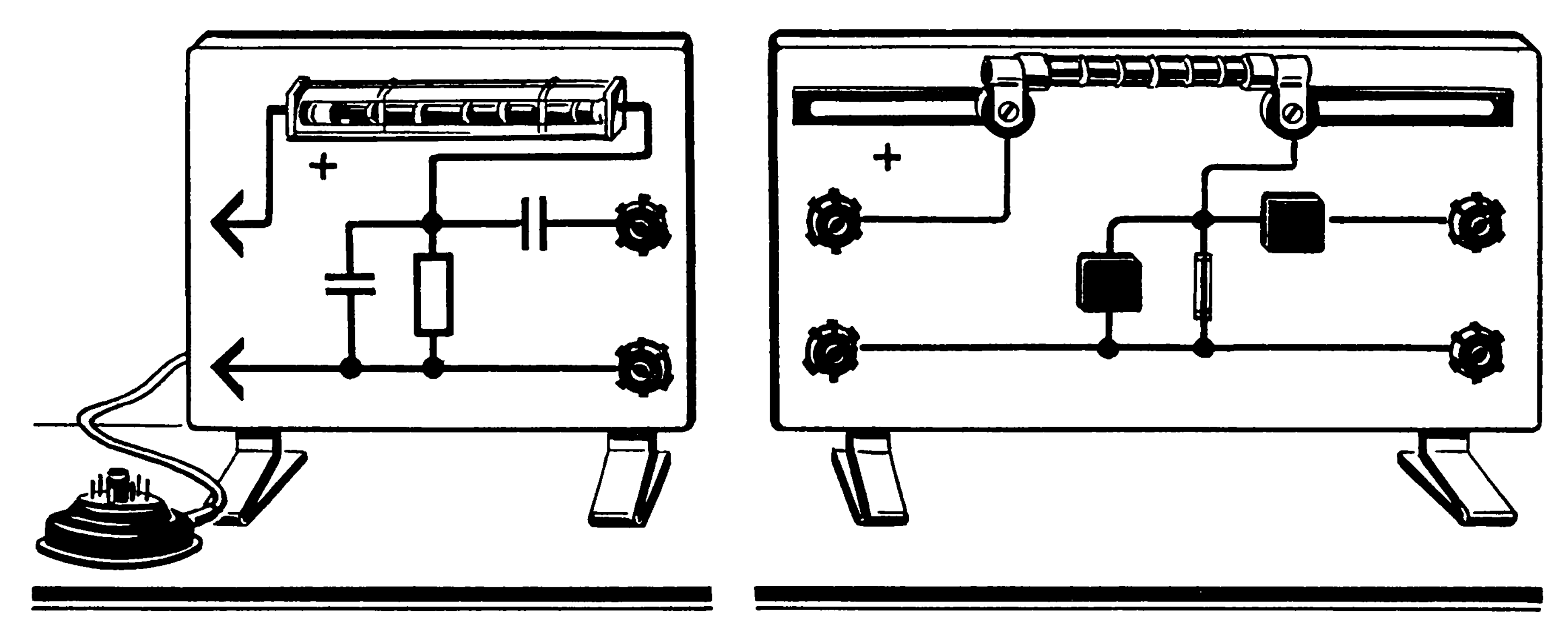


Рис. 246 Рис. 247

в устройстве и эксплуатации, работают при сравнительно низком напряжении 330—440 В, что позволяет для их питания применять универсальные выпрямители типа ВУП. Счетные трубки СТС-5, СТС-6 и СБМ-20 реагируют на бета-частицы с энергией, превышающей 0,5 МэВ, а также они чувствительны к гамма-квантам. Трубка СТС-8 в основном реагирует на гамма-кванты.

Школьная камера Вильсона (рис. 249) предназначена для визуальных наблюдений и проецирования на экран треков альфа-частиц. Поскольку камера неразборная, не нуждается в источнике высокого напряжения, а в качестве источника альфа-частиц используется плутониевый источник АК-30, испускающий альфа-частицы с энергией 5,15 МэВ, то она практически является радиационно безопасной и применяется в самостоятельных наблюдениях учащихся.

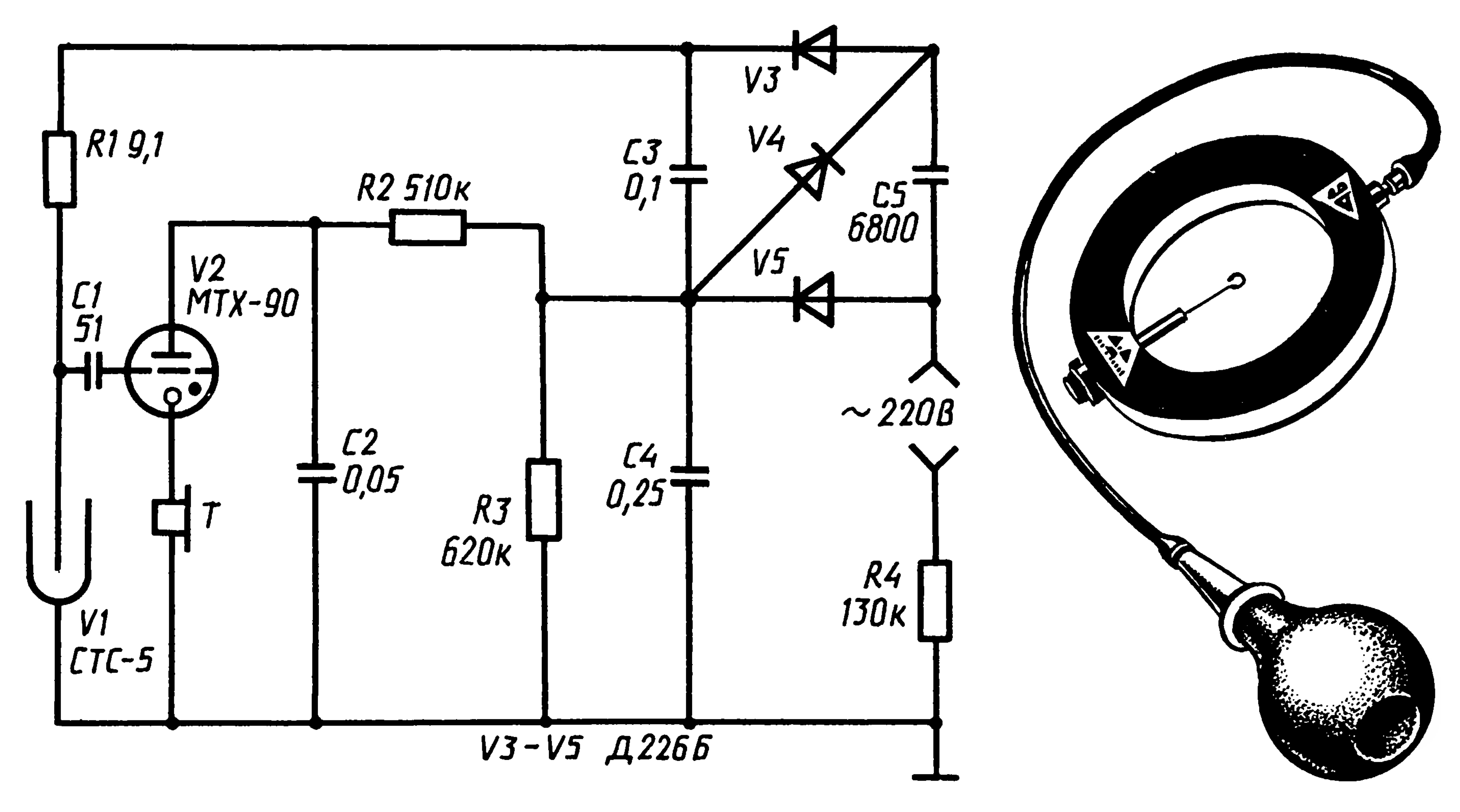


Рис. 248 Рис. 249

Самодельное оборудование

Обобщенная структурная схема приборов и устройств для измерений ионизирующих излучений содержит три основных типа функциональных блоков (узлов):

1. Блок детектирования, т. е. устройство, на вход которого поступают частицы или электромагнитные кванты, а на выходе появляются определенные сигналы, например импульсы напряжения.

2. Блок анализа, который производит отбор сигналов по определенным признакам и осуществляет непосредственные измерения каких-либо их параметров.

3. Блок регистрации, осуществляющий регистрацию, накопление и представление информации в наиболее удобном виде.

Целесообразно в самодельных конструкциях приборов и установок, предназначенных для школьных опытов по ядерной физике, более четко вычленять и отражать указанные функциональные узлы. Это создает запас возможностей для дальнейшего развития учебного эксперимента на основе внедрения новых достижений науки и техники, придает гибкость в выборе методики проведения демонстраций, позволяет описывать работу через функциональное действие узлов, которое они выполняют в конкретном приборе, демонстрационной установке.

1. Детекторы ионизирующих излучений. Конструктивно детектор, в котором используется трубка Гейгера — Мюллера типа СТС-5, СБМ-20, СТС-6 или СТС-8, представляет собой удлиненный параллелепипед, размеры которого соответствуют размерам применяемой счетной трубки (рис. 250), изготовленной из плексигласа или иной пластмассы с размещенной внутри газоразрядной трубкой. Верхняя грань параллелепипеда имеет вырез, соизмеримый с продольным сечением счетной трубки. Нижняя грань с одной стороны выступает на 20—30 мм, что позволяет устанавливать детектор при помощи штатива в необходимом для опытов положении и рационально размещать оборудование во время проведения демонстрационных опытов. На верхней грани установлены три клеммы: электропитание «+350 В», «ОБЩ» и «ВЫХОД». Там же смонтирована электронная схема.

Акт регистрации детектором ионизирующей частицы или гамма-кванта приводит к появлению на выходе остроконечного короткого во времени электрического сигнала с амплитудой в несколько

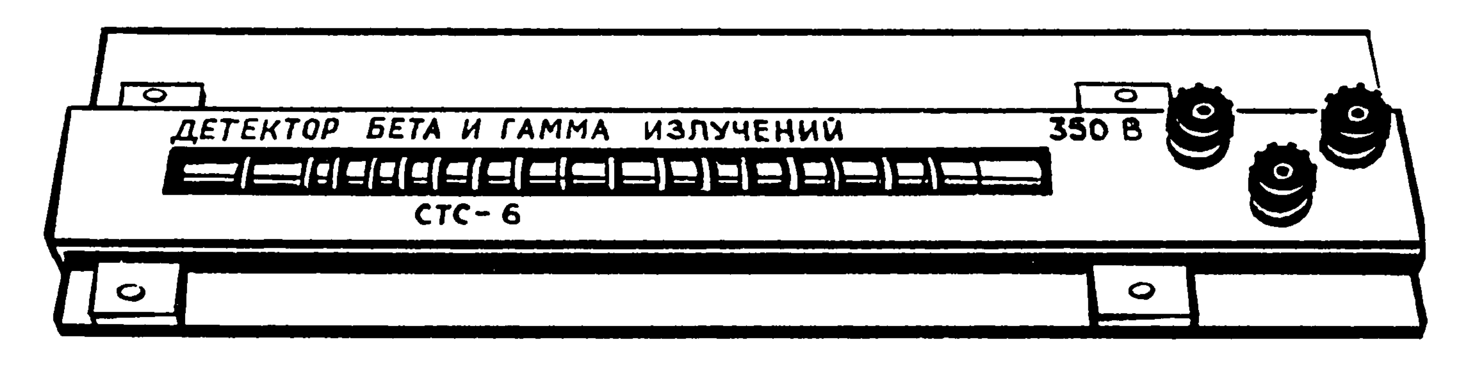


Рис. 250

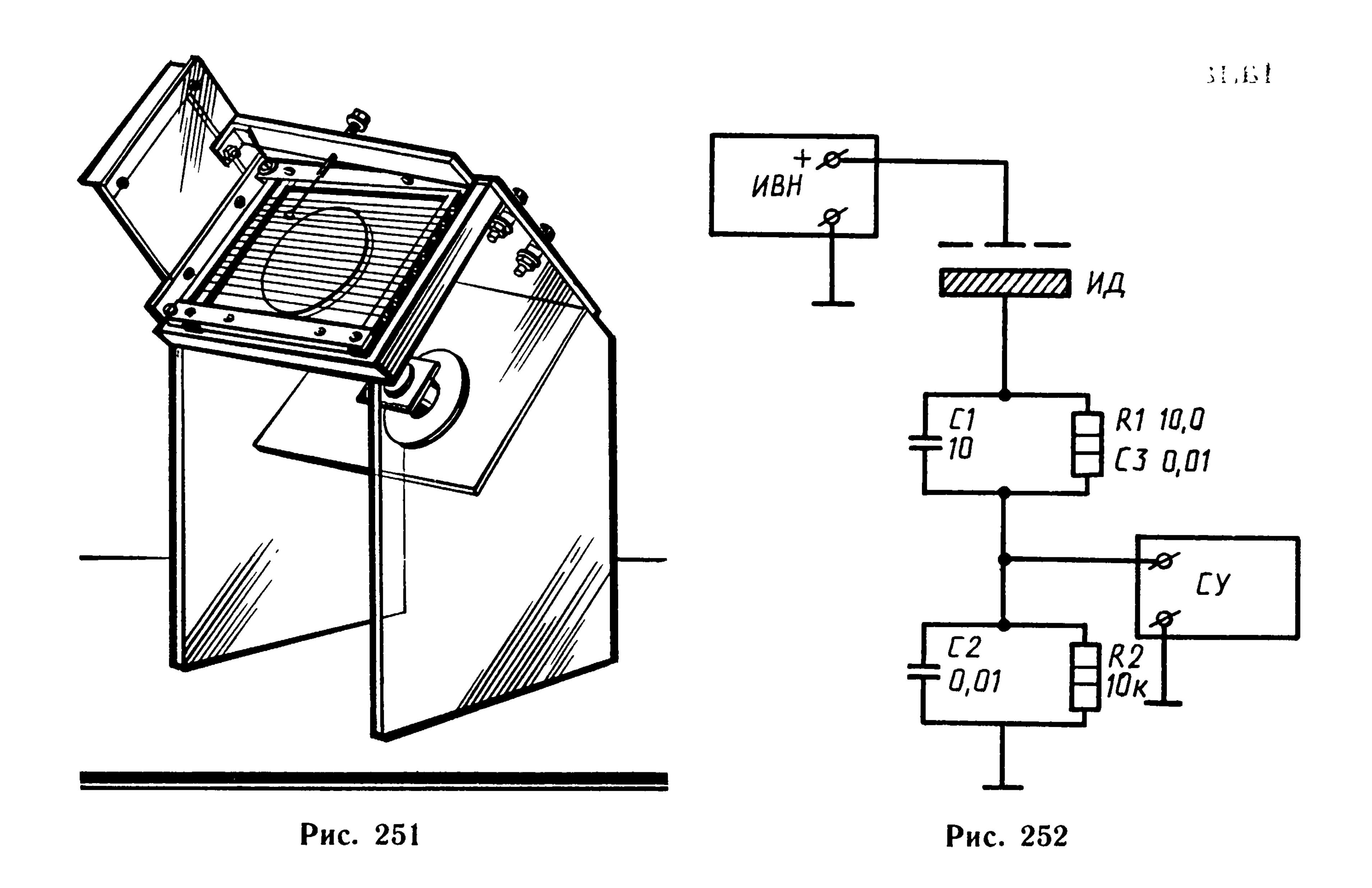


Рис. 251

Рис. 252

десятков вольт. Этот импульс может иметь положительную или отрицательную полярность в зависимости от подключения в электронной схеме детектора высокоомного резистора *R1* к аноду или катоду газоразрядной трубки *V1*.

2. Искровой детектор. Искровой детектор альфа-частиц (рис. 251), устройство, принцип работы, назначение и условия эксплуатации которого подробно описаны в литературе[1], состоит из двух электродов — анода и катода, расположенных на расстоянии 3—8 мм друг от друга в воздухе. Анодом является система параллельных тонких стальных проволок диаметром 0,1—0,2 мм, размещенных в одной плоскости на расстоянии 3—5 мм между собой. Проволоки укреплены на металлической раме, установленной на наклонной пластине с направляющим отверстием в центре. Наклонная пластина изготовлена из изоляционного материала и для хорошей видимости установлена под углом 45° к горизонту на двух вертикальных стойках. Катод изготовлен из железа в форме цилиндрического поршня и имеет отполированную до зеркального блеска рабочую поверхность. Размеры его выбирают в зависимости от размеров прибора в целом. Поршень плотно входит в направляющее отверстие. Преодолевая трение, его можно перемещать к системе проволок. Этим добиваются оптимального режима работы и сводят к минимуму различные побочные эффекты. Механизм перемещения поршня должен обеспечивать надежную изоляцию руки демонстратора от металлических деталей, находящихся под высоким напряжением.

---

[1] См.: Рогаля А. М., Тыщук В. И. Самодельный демонстрационный искровой счетчик альфа-частиц // Физика в школе.— 1983.— № 2.

Налаживание и подготовка к работе искрового детектора обычно не вызывают затруднений. Вначале необходимо произвести юстировку проволок анода, чего достигают одинаковым их натяжением при изготовлении.

Электропитание искрового детектора осуществляют от высоковольтного преобразователя «Разряд-1». При достаточно высоком напряжении между электродами постоянно протекает незначительный ток коронного разряда. Если в этих условиях между анодом и катодом пролетает альфа-частица, характер разряда сразу же изменяется: в месте пролета частицы проскакивает искра. Схема включения искрового детектора альфа-частиц показана на рисунке 252, где ИВН — источник высокого напряжения, СУ — счетная установка, ИД — искровой детектор. Для гашения искрового разряда в электрическую цепь детектора включен высокоомный резистор *R1,* ограничивающий разрядный ток (детали электронной схемы размещены на задней стенке детектора). Импульсы напряжения, возникшие при искровом разряде, на выходе могут достигать нескольких сот вольт, в связи с чем отпадает необходимость их усиления. Искровой детектор в совокупности с любым счетным устройством позволяет проводить подсчет альфа-частиц. Регистрировать их можно на слух и визуально, поскольку искровые разряды сопровождаются значительными оптическими и акустическими эффектами. Отметим, что искровой детектор в рабочем режиме обладает чрезвычайно малым фоном. Это позволяет проводить демонстрации, используя слабоактивные источники альфа-частиц, например источник АК-30 от школьной камеры Вильсона. Его помещают в пластмассовом держателе, который крепится к вертикальной стойке, установленной на наклонной пластине детектора. В стойке проделан вертикальный паз, что позволяет перемещать держатель с источником АК-30 вверх-вниз.

3. Интенсиметр. Измерители средней частоты, или интенсиметры (прежде их называли измерителями скорости счета), получили широкое распространение в экспериментальной ядерной физике при измерении активности радионуклида в источнике излучений, измерении или контроле интенсивности ионизирующих излучений и т. д. Целесообразность применения их в учебном эксперименте объясняется тем, что появляется возможность органически соединить демонстрационный эксперимент по ядерной физике и устное изложение учебного материала учителем, поскольку время, необходимое для демонстрации, и время, отводимое на объяснение опыта, становятся соразмерными. Кроме того, проведенные опыты легко неоднократно повторить. Из-за высокой чувствительности интенсиметров при работе с ними можно широко использовать самодельные радиационно безопасные излучатели бета-частиц и гамма-квантов на основе калийных солей[1], проводить опыты по радиоактивности воздуха, растений, демонстрировать естественный радиационный фон.

---

[1] См. Левкович А. Д., Яворский В. М. Радиационно безопасный школьный источник излучения // Физика в школе.— 1975.— № 2.

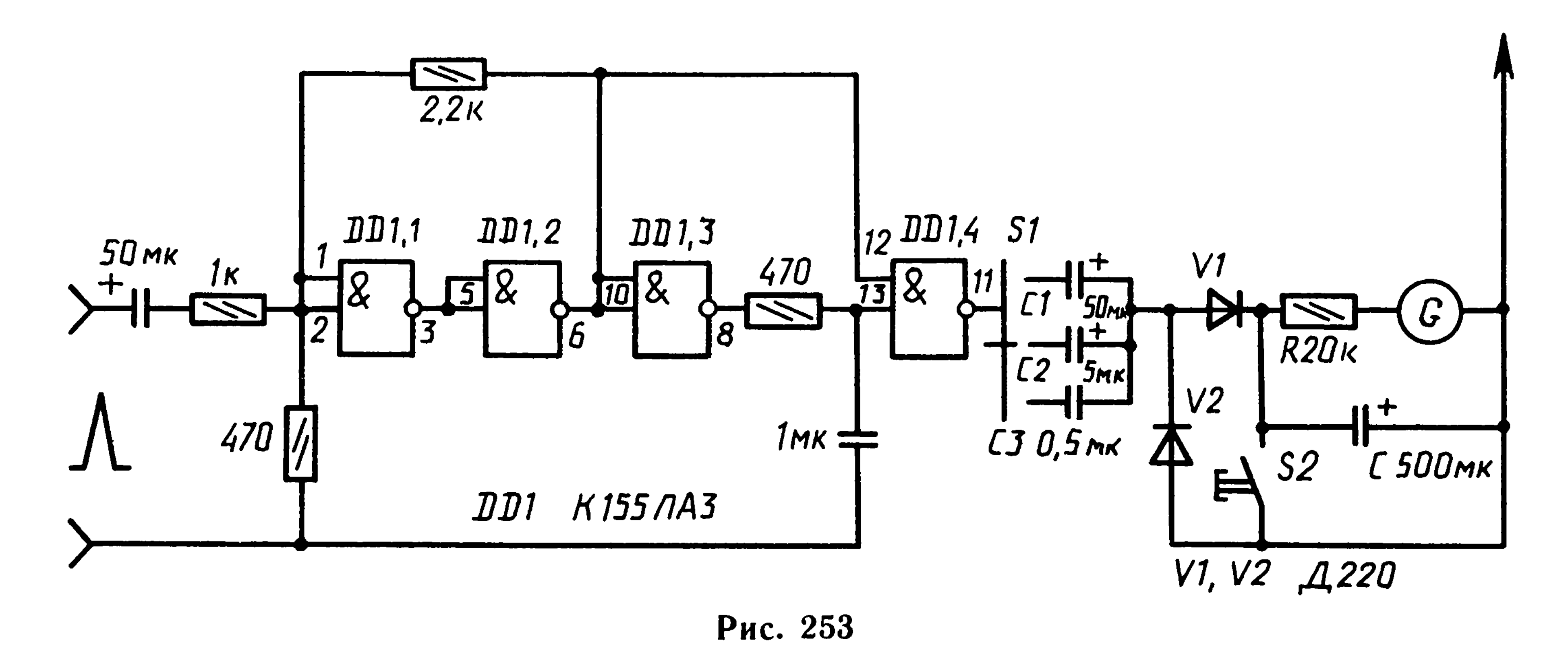


Рис. 253

В методической литературе имеется описание теоретических основ работы, устройства и принципа действия простых транзисторных интенсиметров[1]. На рисунке 253 приведена схема интенсиметра, срабатывающего от импульсов положительной полярности, конструкция которого базируется на микросхеме К155ЛА3. Кроме детектора, на основе одной из газоразрядных трубок Гейгера — Мюллера в его состав входят формирователь стандартных импульсов и интегрирующий контур. Формирователь стандартных импульсов обеспечивает необходимое для проведения количественных измерений в ядерной физике условие: он, независимо от какого детектора поступают на вход сигналы, вырабатывает на выходе и посылает в интегрирующий контур электрические импульсы, одинаковые по форме, амплитуде и длительности. В роли детектора, кроме самодельного, можно использовать также школьные индикаторы ИЧД или ИЧД-2. Изменение чувствительности интенсиметра производят, подсоединяя переключателем *S1* дозирующие конденсаторы *C1*—*C3*. Кнопка *S2* позволяет разряжать накопительный конденсатор *C* и устанавливать стрелку измерительного прибора (гальванометра) на «0». Для электропитания интенсиметра удобно применять выпрямители типа ИЭПП.

Некоторые мелкие приспособления были рассмотрены непосредственно при описании опытов.

§ 21. Демонстрационный осциллограф

Для постановки демонстрационных опытов, очень важных для формирования правильных представлений об электромагнитном поле, необходим демонстрационный осциллограф.

В демонстрационный осциллограф легко переделать лабораторные осциллографы ЭО-6м и ЭО-7. Для этого на их задней стенке

---

[1] См. Тыщук В. И. Установление количественных закономерностей при изучении свойств ионизирующих излучений // Физика в школе.— 1985.— № 2.

в непосредственной близости от панели электронно-лучевой трубки 13ЛО37 надо установить дополнительную панель для подключения трубки 31ЛО33.

Трубка 31ЛО33 устанавливается в отдельном кожухе. К осциллографу ЭО-7 (или ЭО-6м) она подсоединяется экранированным кабелем, вторые концы кабеля заделываются в 14-штырьковый цоколь от вышедшей из строя трубки 13ЛО36 или 13ЛО37.

Очень удобен для постановки классных демонстраций осциллограф конструкции Б. Ю. Миргородского. Такой осциллограф может быть собран на занятиях физико-технического кружка.

Принципиальная схема осциллографа приведена на рисунке 254. Исследуемое напряжение подается на вход усилителя вертикального отклонения луча и через конденсатор *C1* и потенциометр *R1* подводится на управляющую сетку лампы 6Ж8. С помощью потенциометра *R1* регулируется усиление по вертикали. Второй каскад усилителя собран на лампе 6П9 с анодной нагрузкой в виде трансформатора *Тр2,* вторичная обмотка которого соединена с отклоняющей системой электронно-лучевой трубки. Напряжение на экранирующую сетку подается с делителя, образованного резисторами *R8* и *R10.*

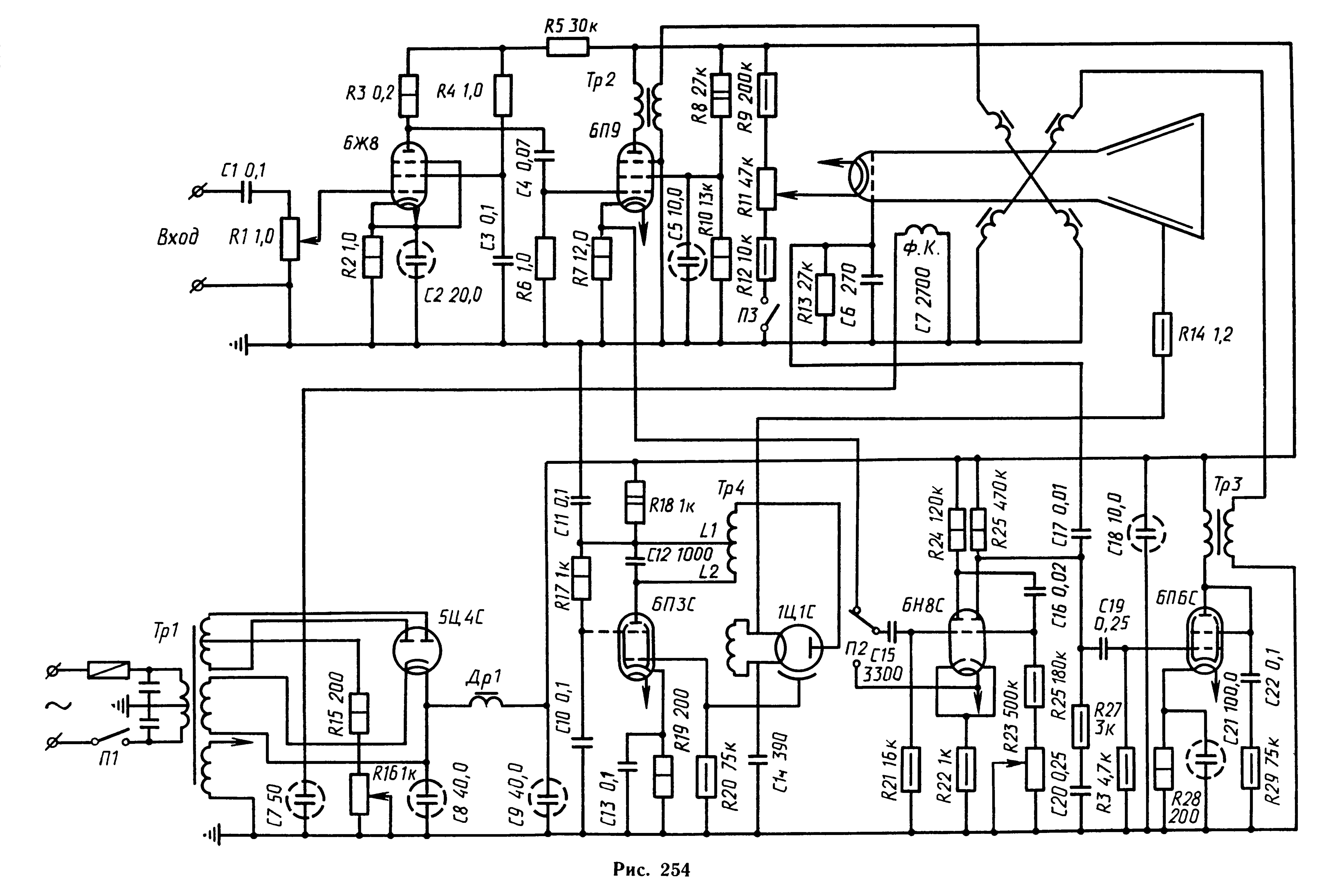
Блок горизонтальной развертки состоит из мультивибратора, собранного на лампе 6Н8С, и усилителя пилообразных колебаний, собранного на лампе 6П6С. Вторичная обмотка трансформатора *Тр3* подключена к катушкам горизонтального отклонения луча. Синхронизация развертки может осуществляться либо от сети, либо от исследуемого напряжения. Вид синхронизации изменяется переключателем *П2,* с помощью которого на сетку левой (по схеме) половины двойного триода 6Н8С подается через конденсатор *C15* либо напряжение накала, либо исследуемое напряжение, снимаемое с потенциометра *R7.* Плавное изменение частоты развертки осуществляется потенциометром *R23.*

Яркость изображения изменяется с помощью потенциометра *R11,* а фокусировка — потенциометра *R16.*

Гашение обратного хода луча достигается подачей отрицательных импульсов с анода правой (по схеме) половины лампы 6Н8С через конденсатор *C17* на управляющий электрод электронно-лучевой трубки.

Питание осциллографа осуществляется от обычного выпрямителя на лампе 5Ц4С и высокочастотного преобразователя напряжения. Последний состоит из высокочастотного блокинг-генератора, собранного на лампе 6П3С, и высоковольтного выпрямителя на кенотроне 1Ц1С. Блокинг-генератор дает напряжение частотой около 100 кГц, которое повышается в высокочастотном трансформаторе *Тр4.*

На передней панели осциллографа установлены только клеммы входа усилителя по вертикали. Ручки управления осциллографом сосредоточены на панели, расположенной на правой стенке прибора, что весьма удобно при постановке демонстраций. Все детали осциллографа фабричные. Силовой трансформатор *Тр1* взят от приемника «Мир», трансформаторы *Тр2* и *Тр3* являются выходными



R5 30к
R3 0,2
R4 1,0
Тр2
R8 27к
R9 200к
6Ж8
6П9
С4 0,07
С1 0,1
R11 47к
Вход
R1 1,0
С3 0,1
С5 10,0
R10 13к
R2 1,0
R6 1,0
R7 12,0
R12 10к
С2 20,0
ф.к.
R13 27к
С6 270
С7 2700
П3
R14 1,2
Тр4
R18 1к
С11 0,1
L1
С12 1000
L2
R24 120к
R25 470к
С17 0,01
С18 10,0
Тр3
R17 1к
С16 0,02
Тр1
5Ц4С
6П3С
1Ц1С
6Н8С
С19 0,25
6П6С
П2
С15 3300
Др1
R15 200
С10 0,1
R19 200
R25 180к
R27 3к
С21 100,0
С22 0,1
~
П1
R16 1к
С13 0,1
R20 75к
С14 390
R21 16к
R22 1к
R23 500к
С20 0,25
R3 4,7к
R28 200
R29 75к
С7 50
С8 40,0
С9 40,0

Рис. 254

трансформаторами кадровой развертки телевизора «Луч». Вторичная обмотка трансформатора *Тр2* перемотана. Она имеет 300 витков провода ПЭЛ-0,35.

Данные об обмотках трансформаторов приведены в таблице.

Таблица

Обозначение обмотки	Марка провода	Число витков	Тип магнитопровода и размеры, мм
Трансформатор *Тр1*			
I	ПЭЛ-0,51	263+41+41+263	Ш—40×50
II	ПЭЛ-0,29	700+700	
III	ПЭЛ-1,0	13	
IV	ПЭЛ-1,35	16	
Трансформатор *Тр2*			
I	ПЭЛ-0,1	4 750	
II	ПЭЛ-0,51	150	Ш — 20×28
Трансформатор *Тр3*			
I	ПЭЛ-0,1	4 750	
II	ПЭЛ-0,35	300	Ш — 20×28
Трансформатор *Тр4*			
I	ПЭШО-0,07	3×1 600	Без сердечника
II	ПЭШО-0,25	300	Каркас из органического
III	ПЭЛ-0,2 в трубке 1		стекла со щечками
Дроссель *Др1*	ПЭЛ-0,29	До заполнения каркаса	Ш — 20×20

Осциллограф широко используется при постановке демонстраций в процессе изучения звука (наблюдение форм кривых, зависимость громкости звука от амплитуды, высоты тона, частоты, сложение колебаний и т. д.); при изучении переменного тока (наблюдение форм кривых различных переменных токов, работа одно- и двухполупериодного выпрямителя, сглаживающего фильтра); при изучении электромагнитных колебаний и волн (демонстрация затухающих колебаний в колебательном контуре, зависимость затухания от активного сопротивления, демонстрация незатухающих колебаний, демонстрация модулированных и детектированных колебаний и т. д.). Используя электронный переключатель, можно наблюдать сдвиг фаз между силой тока и напряжением для индуктивной и емкостной нагрузок, компенсацию сдвига фаз, резонанс напряжений.

Кроме демонстрационных опытов, электронный осциллограф используется и для лабораторных работ учащихся. Следует отметить, что все демонстрации с применением электронного осциллографа весьма наглядны, доступны для учащихся, а постановка их не требует большого труда учителя.

С помощью родителей-специалистов можно изготовить цветной осциллограф, на экране которого одновременно можно наблюдать три цветные осциллограммы (красную, зеленую и синюю). Конструкцию этого осциллографа разработали Б. Ю. Миргородский и С. И. Фролов[1].

Для получения осциллограмм в осциллографе используется способ, отличающийся от применяемого в обычных осциллографах. Суть его состоит в следующем. На экране трубки образуют растр с помощью обычных телевизионных блоков кадровой и строчной разверток. Горизонтальная развертка луча осуществляется блоком кадровой развертки, а вертикальная — блоком строчной развертки (для этого отклоняющую систему на горловине трубки поворачивают на 90° по отношению к ее обычному положению в телевизоре). Растр при этом будет состоять не из строк, как обычно, а из вертикальных линий.

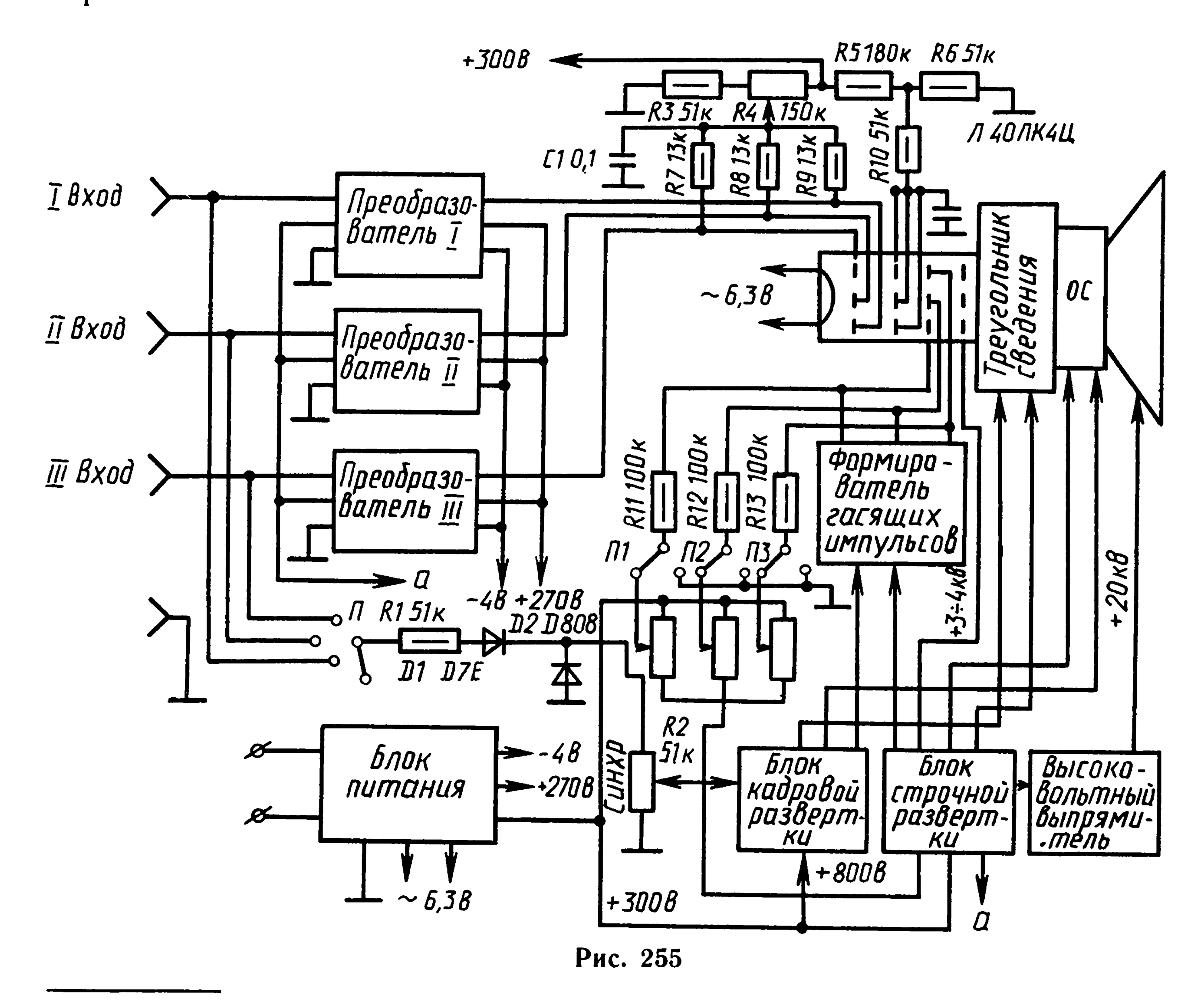


Рис. 255

[1] Успехи физических наук.— Вып. 3.— 1974.— Т. 115.

Исследуемое напряжение с помощью специальной приставки, работа которой строго согласована с работой блока вертикального отклонения, преобразуется в кратковременные импульсы. Каждому такту вертикальной развертки соответствует импульс, который, поступая на модулирующий электрод трубки, вызывает яркое свечение экрана в определенной точке.

Распределение во времени этих импульсов определяется мгновенными значениями исследуемого напряжения. Вследствие этого совокупность ярких точек образует на экране осциллограмму исследуемого напряжения.

На рисунке 255 приведена функциональная схема осциллографа. Как видно из схемы, в приборе использован кинескоп типа 40ЛК4Ц с унифицированной отклоняющей системой и системой сведения, а также унифицированные блоки цветного телевизора: блоки кадровой и строчной разверток, формирователь гасящих импульсов, высоковольтный выпрямитель и блок питания. В блоке кадровой развертки параметры цепи регулировки частоты следует подобрать так, чтобы частотный диапазон генератора начинался примерно с 20 Гц. Это позволит при проведении опытов с сетевым током (50 Гц) получать на экране изображения двух периодов синусоиды (при частоте генератора кадровой развертки 25 Гц). С помощью переменного резистора *R4* осуществляется одновременная регулировка яркости всех трех лучей. Переменные резисторы *R14, R15* и *R16* (см. рис. 255) позволяют производить раздельную регулировку яркостей лучей (ручки этих резисторов выводят под шлиц). На рисунке 256 приведена схема преобразователя для одного канала. Как видно из схемы, импульсы напряжения с демпферной обмотки выходного строчного трансформатора (ТВС), пройдя дифференцирующую цепь (*C3R8*), поступают на сетку разрядной лампы *Л2а,* которую положительные импульсы отпирают. При этом конденсатор *C5* через лампу разряжается и на резисторе *R6* возникает пилообразное напряжение, которое через конденсатор *C4* и резистор *R7* подается на сетку лампы *Л1а.* Лампы *Л1а* и *Л1б* выполняют роль двустороннего ограничителя пилообразного напряжения. Ограниченные (за максимумом и минимумом) пилообразные импульсы превращаются в трапецеидальные импульсы, близкие по форме к П-образным. С помощью цепи (*C7R15*) эти импульсы дифференцируются, в результате чего образуются импульсы различной полярности: момент возникновения положительного импульса соответствует началу П-образного импульса, а момент возникновения отрицательного — концу П-образного импульса. Отрицательные импульсы срезаются лампой *Л2б,* а положительные, будучи повернутыми по фазе на 180°, с анода лампы *Л2б* через конденсатор *C8* поступают на катод трубки, вызывая появление на экране ярких точек. Совокупность этих точек образует светящуюся горизонтальную линию. Если на сетку лампы *Л1а* подать исследуемое напряжение, то двустороннее ограничение пилообразного напряжения в различные моменты времени будет происходить выше либо ниже той части пилообразного импульса, по которой произво-

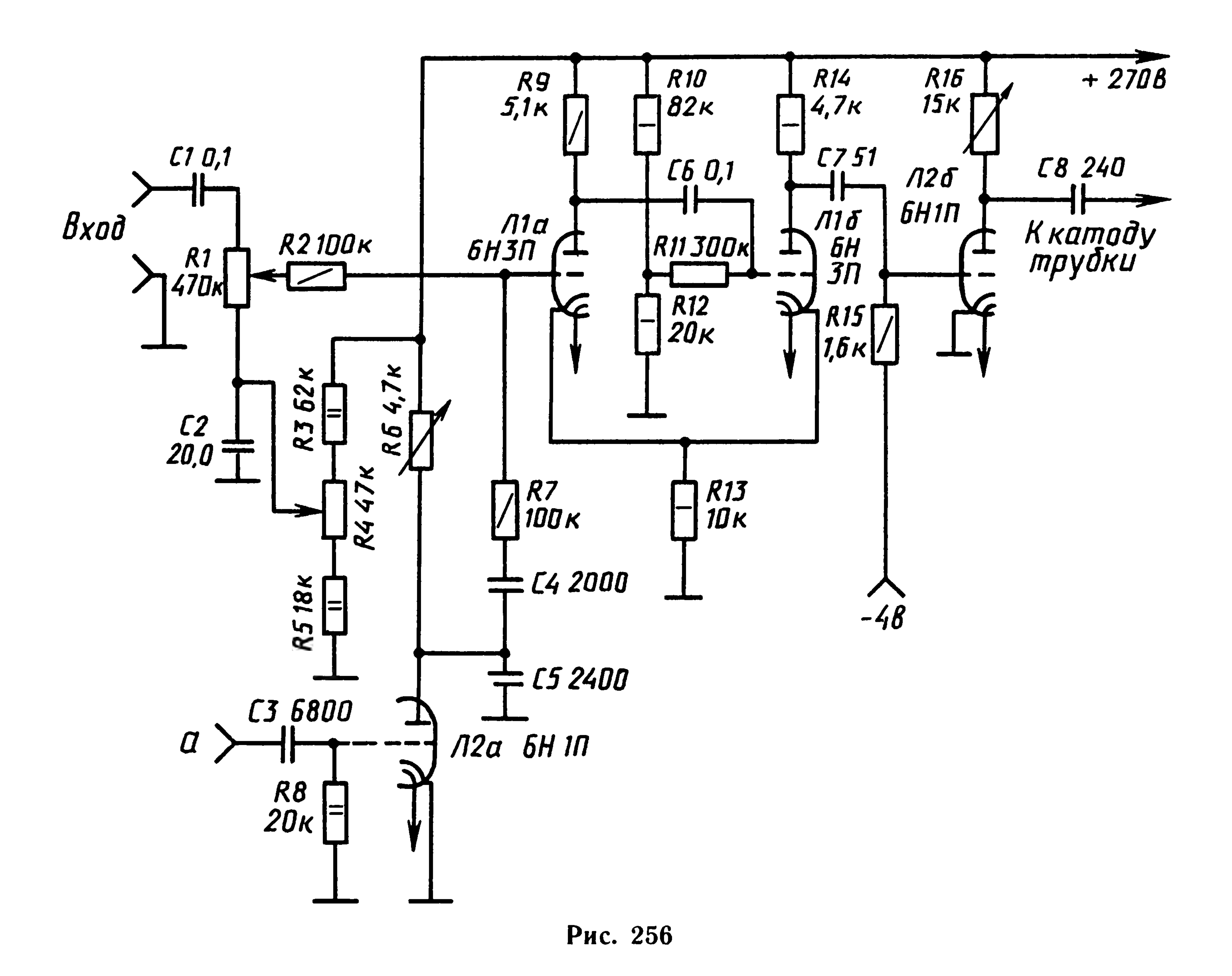


Рис. 256

дилось ограничение в отсутствие исследуемого напряжения. В результате этого изменится распределение во времени передних фронтов П-образных импульсов, а соответственно и положение светящихся точек на экране трубки — возникает осциллограмма исследуемого напряжения. Чувствительность осциллографа с описываемым преобразователем составляет примерно 1 см/В.

С помощью переменного резистора *R1* устанавливают вертикальный размер изображения. Переменный резистор *R4* позволяет перемещать осциллограмму в вертикальном направлении. (Переменными резисторами *R6* и *R16* пользуются только при налаживании преобразователя.) Преобразователи каналов II и III имеют аналогичные схемы. Для получения неподвижных осциллограмм генератор блока кадровой развертки синхронизируется импульсами исследуемого напряжения. Наличие цепи *R1D1D2R2* позволяет подавать на генератор импульсы нужной полярности напряжением не более 8 В, что предохраняет генератор от возможной порчи при подаче на вход осциллографа высоких напряжений (сотни вольт). Переключатель *П* дает возможность подключать цепь синхронизации к одному из трех входов осциллографа.

Верхний предел частот напряжений, при которых обеспечивается качественное получение осциллограмм, составляет примерно 2—2,5 кГц. При более высоких частотах качество осциллограмм

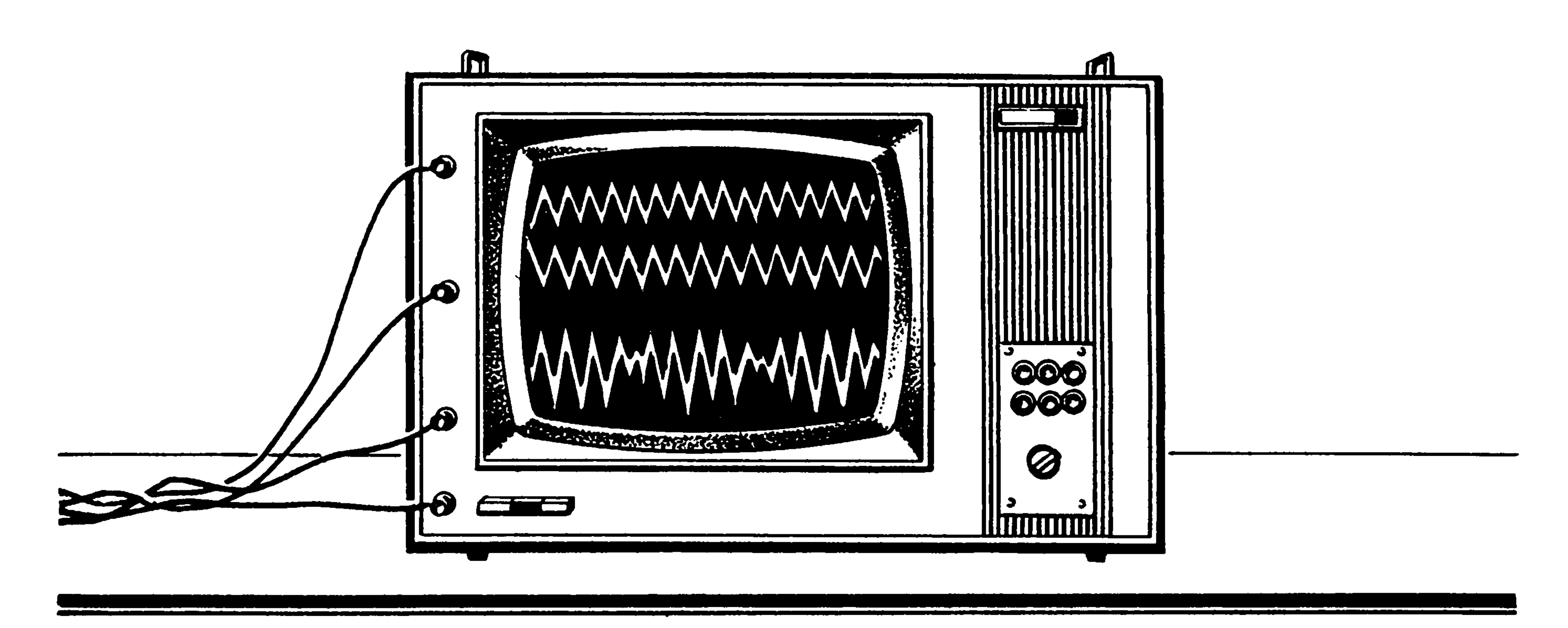


Рис. 257

снижается, так как число точек, приходящихся на один период исследуемого напряжения, будет слишком мало. Несмотря на эту особенность осциллографа, его демонстрационные возможности весьма широки.

Осциллограф может быть использован при изучении фазовых соотношений в цепях, содержащих *R*, *L* и *C*, последовательного и параллельного резонанса, трехфазного тока (фазовые и амплитудные соотношения), фазовых соотношений в трансформаторе, колебательного контура, низкочастотных генераторов, усилителей и многих других вопросов, связанных с колебательными процессами.

На рисунке 257 показан общий вид осциллографа (на экране изображены осциллограммы, демонстрируемые при сложении колебаний).

Простые, но весьма полезные приспособления

Для большей наглядности собранных цепей переменного тока, а также для облегчения работы учителя на уроке и для избежания всевозможных «накладок» весьма полезно собрать два щитка.

Первый состоит из сухого листа фанеры или, что лучше,— пластика, на котором укреплены две универсальные клеммы и нарисован знак переменного тока. Сзади к клеммам припаяны гибкие провода, концы которых заделаны в стандартную вилку для включения в сеть. Щиток с помощью струбцинки (или подставки от универсального штатива) укрепляется на краю демонстрационного стола. Применение щитка целесообразно прежде всего потому, что подчеркивается мысль о том, что в цепи используется переменный ток.

Второй щиток также собран на изолирующем основании и в основном предназначен для сборки цепей переменного тока, собираемых для изучения в них фазовых соотношений. Укрепленная на щите лампа накаливания — своеобразный индикатор силы тока, протекающего по цепи. Осциллограмма, снимаемая с клемм, подводящих ток к лампе,— осциллограмма силы тока, так как напряжение на лампе пропорционально силе тока.

К нижним клеммам подключается нагрузка (электроплитка, батарея конденсаторов, катушка индуктивности). Осциллограмма, снимаемая с этих клемм,— осциллограмма напряжения. Щиток удобен еще и потому, что при сборке цепей учителю не надо бояться перепутать проводники, которые надо подключить к общему проводу (корпусу) электронного переключателя: это всегда два провода, отходящие от правой нижней клеммы (см. рис. 36).

Демонстрация с использованием батареи конденсаторов становится значительно нагляднее, если к батарее прикрепить панель с клеммами и условным изображением конденсатора переменной емкости (см. рис. 2, 8, 14, 18, 20, 37, *б* и др.).

Иногда полезно внести небольшие, внешние усовершенствования заводских приборов. Так, например, для повышения наглядности собираемых цепей полезно клеммы у осциллографа расположить так, как показано на рисунках 5, 8, 14 и др. Аналогично следует расположить и клеммы на усилителе звуковой частоты, поляризованном реле и других приборах. Подобные «переделки» крайне просты и под силу любому из учащихся старших классов.

ЛИТЕРАТУРА

Гринбаум М. И. Самодельные приборы по физике.— М.: Просвещение, 1972.

Демонстрационный эксперимент по физике в средней школе / Под ред. А. А. Покровского.— М.: Просвещение, 1978—1979.— Ч. 1—2.

Евсюков А. А. Электронное оборудование по физике.— М.: Просвещение, 1977.

Евсюков А. А. Электронный осциллограф в преподавании физики.— М.: Просвещение, 1972.

Миргородский Б. Ю., Шабаль В. И. Демонстрационный эксперимент по физике. Колебания и волны.— Киев: Радяньска школа, 1985.

Молотков Н. Я. Изучение колебаний на основе современного эксперимента.— Киев: Вища школа, 1988.

Молотков Н. Я. Радиоволны в демонстрационном эксперименте по оптике.— Киев: Вища школа, 1981.

Перкальскис Б. Ш. Использование современных научных средств в физических демонстрациях.— М.: Наука, 1971.

Хорошавин С. А. Техника и технология демонстрационного эксперимента.— М.: Просвещение, 1978.

Шахмаев Н. М. Демонстрационные опыты по разделу «Колебания и волны».— М.: Просвещение, 1974.

Шахмаев Н. М., Каменецкий С. Е. Демонстрационные опыты по электродинамике.— М.: Просвещение, 1973.

ОГЛАВЛЕНИЕ

§ 6. Автоколебания

§ 7. Параметрические колебания

§ 8. Сложение колебаний

§ 9. Модуляция колебаний

ГЛАВА II. ВОЛНЫ

§ 10. Предварительные сведения о волнах

§ 11. Основные свойства волн

РАЗДЕЛ III. САМОДЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Учебное издание

Шахмаев Николай Михайлович
Павлов Николай Илларионович
Тыщук Виталий Иванович

ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ

Колебания и волны. Квантовая физика

Зав. редакцией *В. А. Обменина*
Редактор *Т. П. Каткова*
Младший редактор *О. В. Агапова*
Художественный редактор *В. М. Прокофьев*
Технический редактор *Т. П. Локтионова*
Корректор *С. В. Коверьянова*

ИБ № 12380

Сдано в набор 04.05.90. Подписано к печати 20.05.91. Формат $60 \times 90^1/_{16}$. Бум. офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14+0,25 форзац. Усл. кр.-отт. 14,69. Уч.-изд. л. 14,47+0,42 форзац. Тираж 127 000 экз. Заказ № 2514.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Министерства печати и массовой информации РСФСР. 129846. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41

Смоленский полиграфкомбинат Министерства печати и массовой информации РСФСР. 214020, Смоленск, ул. Смольянинова, 1.